

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ТАВРІЙСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ В.І. ВЕРНАДСЬКОГО**

Журнал заснований у 1918 році

**ВЧЕНІ ЗАПИСКИ
ТАВРІЙСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
ІМЕНІ В.І. ВЕРНАДСЬКОГО**

Серія: Технічні науки

Том 34 (73) № 2 2023

Частина 1



Видавничий дім
«Гельветика»
2023

Головний редактор:

Кисельов Володимир Борисович – доктор технічних наук, професор, директор Навчально-наукового інституту муніципального управління та міського господарства Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського.

Члени редакційної колегії:

Медведєв Микола Георгійович (відповідальний секретар) – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри загальноінженерних дисциплін та теплоенергетики Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;

Бронін Сергій Вадимович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних систем та технологій Київського національного університету імені Тараса Шевченка;

Домніч Володимир Іванович – кандидат технічних наук, професор, завідувач кафедри автоматизованого управління технологічними процесами Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;

Дехтяр Анатолій Соломонович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри архітектурних конструкцій Національної академії образотворчого мистецтва і архітектури;

Дичко Аліна Олегівна – доктор технічних наук, професор, професор кафедри геоінженерії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

Дубко Валерій Олексійович – доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри вищої математики Київського національного університету технологій та дизайну;

Єремєєв Ігор Семенович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри автоматизованого управління технологічними процесами Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;

Лисенко Олександр Іванович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри телекомунікацій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

Огородник Станіслав Станіславович – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, професор кафедри загальноінженерних дисциплін та теплоенергетики Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;

Сегай Олександр Михайлович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри загальноінженерних дисциплін та теплоенергетики Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;

Чумаченко Сергій Миколайович – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, завідувач кафедри інформаційних систем Національного університету харчових технологій;

Цомко Олена – доктор філософії по спеціальності «Безпека і управління інформацією», відділення комп'ютерної інженерії, Інститут Міжнародної освіти, Університет Донгсо, Республіка Корея.

Статті у виданні перевірені на наявність плагіату за допомогою програмного забезпечення StrikePlagiarism.com від польської компанії Plagiat.pl.

**Рекомендовано до друку та поширення через мережу Internet
Вченою радою Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського
(протокол № 15 від 02.06.2023 року)**

Науковий журнал «Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки» зареєстровано Міністерством юстиції України (Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого ЗМІ серія КВ № 22895-12795Р від 11.08.2017 року)

Журнал включено до Переліку наукових фахових видань України (категорія «Б») з технічних наук (спеціальності: 144. Теплоенергетика, 161. Хімічні технології та інженерія, 172. Телекомунікації та радіотехніка) відповідно до Наказу МОН України від 17.03.2020 № 409 (додаток 1), 121. Інженерія програмного забезпечення, 123. Комп'ютерна інженерія, 126. Інформаційні системи та технології, 151. Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології, 275. Транспортні технології (за видами) відповідно до Наказу МОН України від 02.07.2020 № 886 (додаток 4)

Журнал включено до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus International (Республіка Польща)

Сторінка журналу: www.tech.vernadskyjournals.in.ua

ISSN 2663-5941 (Print)

ISSN 2663-595X (Online)

© Таврійський національний університет ім. В.І. Вернадського, 2023

ЗМІСТ

ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ У МАШИНОБУДУВАННІ

Бернацький А.В., Соколовський М.В., Сіора О.В., Бондарєва В.І., Шамсутдінова Н.О. МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ, ЩО ВИНИКАЮТЬ ПРИ ЛАЗЕРНОМУ ЗВАРЮВАННІ ТОНКОСТІННИХ СТИКОВИХ З'ЄДНАНЬ БАГАТОКОМПОНЕНТНИХ ЖАРОМІЦНИХ СПЛАВІВ ДЛЯ ВИРОБІВ АЕРОКОСМІЧНОЇ ТЕХНІКИ.....	1
--	---

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

Petryk V.O., Trubachev S.I., Kolodezhnyi V.A. RELIABILITY OF WIRE POTENTIOMETRIC SENSORS USED IN THERMAL POWER INDUSTRY...9	9
Petryk V.O., Trubachev S.I., Kolodezhnyi V.A. RESEARCH OF CONTACT RESISTANCE IN HEAT-RESISTANT PRECISION POTENTIOMETERS.....	14

ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

Бурик М.П., Лободзинський В.Ю., Бурик І.П., Гричановська Т.М., Бібик В.В. МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ ДВОЖИЛЬНОГО КАБЕЛЮ ЗА ДОПОМОГОЮ СИСТЕМИ ЧОТИРЬОХ ЗАРЯДЖЕНИХ ОСЕЙ.....	18
Голошапов С.С., Колебанов О.К. ВЗАЄМОЗВ'ЯЗОК НАВАНТАЖУВАЛЬНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ.....	26

ПРИЛАДИ

Дядюн Н.А., Корнєв В.П. ПРИСТРІЙ НИЗЬКОРІВНЕВОГО ТЕСТУВАННЯ АВТОМОБІЛЬНОЇ ШИНИ ДАНИХ CAN.....	31
Монченко О.В., Мовчан Н.С., Чубко Л.С., Марченко Н.Б., Ковтонюк І.Ю. ПОКРАЩЕННЯ ТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИЛАДУ ДЛЯ УСУНЕННЯ ДЕФЕКТІВ ШКІРИ.....	41
Скакун О.В., Сивобородько А.В. ОГЛЯД ПОРТАТИВНИХ СУЧАСНИХ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ ДЛЯ ЕКОЛОГІЧНОГО КОНТРОЛЮ.....	47

РАДІОТЕХНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

Воловик А.Ю. ЛОКАЛЬНО ОПТИМАЛЬНІ РОБАСТНІ ОЦІНКИ СТАНУ ЛІНІЙНИХ СИСТЕМ З НЕВИЗНАЧЕНИМИ ВХОДАМИ.....	56
Загреба А.Я., Лебедев Д.Ю. РОЗРОБКА СХЕМОТЕХНІЧНОГО РІШЕННЯ ЦИФРОВОГО МЕТЕО-ХРОНОМЕТРА.....	62
Manko O.O., Kunah N.I., Kharlai L.O., Nikiforenko K.V., Kononov O.Yu., Sotnichenko Yu.O. PROTECTION OF INPUT CIRCUITS OF MICROWAVE RANGE RADIO RELAY STATIONS RECEIVERS AGAINST POWERFUL IMPULSE INTERFERENCES.....	67
Могилевич Д.І., Кононова І.В., Щиголь Ю.Ф. МОДЕЛЬ НАДІЙНОСТІ ОБЛАДНАННЯ ЕЛЕКТРОННОЇ КОМУНІКАЦІЙНОЇ МЕРЕЖІ З УРАХУВАННЯМ ВІДМОВ І ЗБОЇВ.....	74
Павлов Л.М., Яганов П.О. ОПТИМІЗАЦІЯ ІНТЕГРАЛЬНОГО ПОРОГОВОГО СЕНСОРА ТЕМПЕРАТУРИ.....	80
Прокопєць В.А., Глоба Л.С. МЕТОД МІЖСЕКТОРАЛЬНОГО ПЕРЕРОЗПОДІЛУ КОРИСТУВАЧІВ НА БАЗІ ТЕХНОЛОГІЇ ЦИФРОВОГО ДВІЙНИКА.....	87
Сайко В.Г., Наритник Т.М. ЗАСТОСУВАННЯ БЛОКЧЕЙН СИСТЕМИ ДЛЯ БЕЗПЕЧНОГО ОБМІНУ ПОВІДОМЛЕНЬ В ГЕТЕРОГЕННИХ МОБІЛЬНИХ МЕРЕЖАХ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДІАПАЗОНУ.....	92

Сайко В.Г., Наритник Т.М. МОДЕЛЬ ПРОГНОЗУВАННЯ СИСТЕМНИХ ПАРАМЕТРІВ БЛОКЧЕЙН-СИСТЕМ В ГЕТЕРОГЕННИХ МОБІЛЬНИХ МЕРЕЖАХ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДІАПАЗОНУ.....	98
Сайко В.Г., Наритник Т.М. ТРИВИМІРНІ БАГАТОШАРОВІ МЕРЕЖІ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДІАПАЗОНУ.....	104
Semenov A.O., Semenova O.O., Voitsekhovska O.O., Khloba A.A., Ovcharuk A.O. DIAGNOSTIC DEVICE FOR GAS-FILLED DEVICES FOR VISUAL REPRODUCTION OF THE INFORMATION.....	110
Цяпа С.М. КОМПЛЕКСНА МЕТОДИКА ЗАХИСТУ ІНФРАСТРУКТУРИ МЕРЕЖІ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ 5G.....	116

ІНФОРМАТИКА, ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ

Болобан О.А., Петренко А.І. ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ АЛГОРИТМУ EMD ДЛЯ ОЦІНКИ РІВНЯ КИСНЮ В КРОВІ.....	125
Бочок В.О., Федорова Н.В. БАГАТОАГЕНТНІ СИСТЕМ ТА ПРОБЛЕМИ ЇХ ОПТИМІЗАЦІЇ.....	131
Галаган Р.М., Андрєєв С.М., Петрик В.Ф., Баженов В.Г., Лисенко Ю.Ю. ВИЯВЛЕННЯ ДЕФЕКТІВ БЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ЗОБРАЖЕНЬ ЗА ДОПОМОГОЮ ЗГОРТКОВИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ.....	138
Гузь Д.Р., Штіфзон О.Й., Новіков П.В., Любицький С.В. СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ СТАНУ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА НА БАЗІ ІОТ ПРИСТРОЮ.....	145
Івохін Є.В., Гавриленко В.В., Омєцинська Н.В., Івохіна К.Є., Рудоман Н.В. ПРО ОДИН ПІДХІД ДО РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧІ КОМІВОЯЖЕРА ЗА ДОПОМОГОЮ МЕТОДУ ОРЛНА ОПТИМІЗАЦІЇ ПОТОКІВ ДАНИХ.....	153
Кандиба І.О., Фісун М.Т., Горбань Г.В., Степанчук Д.К. ГЕНЕРАТОР МУЛЬТИАЛФАВІТНИХ СИНТАКСИЧНИХ АНАЛІЗАТОРІВ З ГРАФІЧНИМ ВІДОБРАЖЕННЯМ СИНТАКСИЧНОГО ДЕРЕВА.....	158
Кравченко О.С., Демченко М.О., Волошко О.В., Філіппова М.В. АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ РЕСУРСІВ ПІДПРИЄМСТВА ЗА ДОПОМОГОЮ ЦИФРОВОГО ДВІЙНИКА.....	164
Курганов І.Д. ОПТИМАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ ПРИВОДНИМ БАРАБАНОМ СТРІЧКОВОГО КОНВЕЄРА В АВТОМАТИЧНИХ СИСТЕМАХ З РОЗПОДІЛЕНИМИ ПАРАМЕТРАМИ ВИКОРИСТОВУЮЧИ ПРИНЦИПИ РУХЛИВОГО КЕРУВАННЯ.....	170
Лісовець С.М., Ківа І.Л., Гуйда О.Г., Вишемірська Я.С. ОРГАНІЗАЦІЯ ДОСТУПУ ДО ДАНИХ В SCADA-СИСТЕМАХ ЗА ДОПОМОГОЮ MICROSOFT SQL SERVER.....	175
Макарова Л.М., Камінський С.С., Бризгалов М.В. РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ЗНАХОДЖЕННЯ ВНЕСЕНИХ ЗМІН В КОД ВИКОНУВАНИХ ФАЙЛІВ.....	179
Маріяш Ю.І., Степанець О.В., Любицький С.В. СПОСІБ РЕАЛІЗАЦІЇ МОДЕЛЬНО-ПРОГНОЗУЮЧОГО КЕРУВАННЯ ПАРАМЕТРАМИ РЕЖИМУ ДУТТЯ КИСНЕВО-КОНВЕРТЕРНОГО ПРОЦЕСУ В ПРОГРАМОВАНОМУ ЛОГІЧНОМУ КОНТРОЛЕРІ.....	186
Мельничук Б.П., Шевченко В.В. КОМПЛЕКСНА СИСТЕМА КОНТРОЛЮ ПРОЦЕСУ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ ПРИЛАДІВ В АВТОМАТИЗОВАНОМУ ВИРОБНИЦТВІ.....	193
Муравйов О.В., Довбиш І.О., Галаган Р.М., Богдан Г.А., Момот А.С. ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ПІДВИЩЕННЯ РІВНЯ АВТОНОМНОСТІ БПЛА.....	199

Nevliudov I.Sh., Yevsieiev V.V., Demska N.P., Kostrova H.Yu. DEVELOPMENT AND IMPROVEMENT OF THE DESIGN OF A LIGHTWEIGHT MOBILE ROBOT MANIPULATOR USING GENERATIVE DESIGN.....	206
Павлов В.Г. КОНТЕКСТНИЙ ПІДХІД У АНАЛІЗІ СХОЖОСТІ ТЕКСТІВ ПРОГРАМ.....	214
Протасов А.Г., Сторожик Д.В. ТЕХНОЛОГІЇ АВТОМАТИЗАЦІЇ ДІАГНОСТИКИ ДОРОЖНЬОГО ПОКРИТТЯ.....	219
Редько І.В., Зилевіч М.О. РЕДУКЦІЙНЕ ПРОГРАМУВАННЯ ЗАДАЧ У ТЕХНОЛОГІЧНОМУ СЕРЕДОВИЩІ ПРОГРАМУВАННЯ.....	228
Sarnatskyi V.V., Baklan I.V. STRACEENV: A PLATFORM FOR DEVELOPMENT AND ANALYSIS OF AGENT-BASED EPIDEMIOLOGICAL MODELS USING STRACE LANGUAGE.....	234
Ткачук А.Г. КОНЦЕПЦІЯ ПІДБОРУ ДВИГУНІВ МОБІЛЬНОЇ РОБОТИЗОВАНОЇ ПЛАТФОРМИ ІЗ АВТОНОМНОЮ СИСТЕМОЮ СТАБІЛІЗАЦІЇ	241
Ushakova I.O., Hrabovskiy Ye.M., Bondarenko D.O. MODELING AND SELECTION OF A DISTANCE LEARNING SYSTEM FOR A HIGHER EDUCATION INSTITUTION BASEDON THE METHOD OF HIERARCHY ANALYSIS USING THE DSS.....	246
Федотова М.О., Мацуй А.М., Трушаков Д.В., Сербул О.М., Березюк І.А., Скриннік І.О. ТЕХНОЛОГІЯ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ДИНАМІКИ БАГАТОВИМІРНОГО ОБ'ЄКТА ТА ЇЇ ПРИКЛАДНЕ ЗАСТОСУВАННЯ.....	255
Чумаченко С.М., Кутовий О.П., Гуйда О.Г., Попель В.А., Заїка Н.В. КОМПЛЕКСНИЙ ПІДХІД ДО ВИЗНАЧЕННЯ РІВНЯ БЕЗПЕКИ КРИТИЧНОЇ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ НА ОСНОВІ ІНТЕГРАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ЗАХИСТУ ЇЇ ОБ'ЄКТІВ ВІД БПЛА ТА КРИЛАТИХ І БАЛІСТИЧНИХ РАКЕТ.....	261
ЕНЕРГЕТИКА	
Баранюк О.В., Воробйов М.В., Кінзерський А. МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОГІДРАВЛІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОДОГРІЙНОГО КОТЛА ПРИ СПАЛЮВАННІ ПАЛИВНИХ ПЕЛЕТ З ТВЕРДИХ СОРТІВ ДЕРЕВИНИ.....	268
Босий М.В. СПРОЩЕНА ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ УТВОРЕННЯ ГАЗОГІДРАТІВ НА ПОВЕРХНІ РОЗДІЛУ ФАЗ «ГАЗ-ВОДА».....	276
Семичаєвський С.В., Самченко Т.В. ДОСЛІДЖЕННЯ СЦЕНАРІЇВ МОЖЛИВИХ ПОЖЕЖ В МАШИННИХ ЗАЛАХ АТОМНИХ І ТЕПЛОВИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ.....	281
Сінчук І.О., Котякова М.Г. КОНТРОЛЬ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В АСПЕКТІ ВПРОВАДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ MICRO GRID.....	288
Шахбазов І.О., Сірий О.А. ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ БІОПАЛИВА В ПОБУТОВИХ КОТЕЛЬНИХ УСТАНОВКАХ...	293
ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ.....	299

CONTENTS

MATERIAL PROCESSING IN MECHANICAL ENGINEERING

Bernatskyi A.V., Sokolovskyi M.V., Siora O.V., Bondarieva V.I., Shamsutdinova N.O.

SIMULATION OF THERMAL PROCESSES OCCURRING DURING LASER WELDING OF THIN-WALLED BUTT JOINTS OF MULTICOMPONENT HEAT-RESISTANT SUPERALLOYS FOR AEROSPACE APPLICATIONS.....1

INDUSTRIAL ENGINEERING

Petryk V.O., Trubachev S.I., Kolodezhnyi V.A.

RELIABILITY OF WIRE POTENTIOMETRIC SENSORS USED IN THERMAL POWER INDUSTRY...9

Petryk V.O., Trubachev S.I., Kolodezhnyi V.A.

RESEARCH OF CONTACT RESISTANCE IN HEAT-RESISTANT PRECISION POTENTIOMETERS....14

ELECTRICAL ENGINEERING

Buryk M.P., Lobodzynskyi V.Yu., Buryk I.P., Grychanov'ska T.M., Bibyk V.V.

SIMULATION OF THE ELECTRIC FIELD OF A TWO-WIRE CABLE USING A SYSTEM OF FOUR CHARGED AXES.....18

Gouoschapov S.S., Kolebanov O.K.

INTERCONNECTION OF THE LOADING MODES OF THE ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE.26

EQUIPMENT

Diadiun N.A., Kornev V.P.

DEVICE FOR LOW-LEVEL DIAGNOSING OF AUTOMOTIVE CAN DATA BUS.....31

Monchenko O.V., Movchan N.S., Chubko L.S., Marchenko N.B., Kovtoniuk I.Yu.

IMPROVEMENT OF TECHNICAL CHARACTERISTICS OF THE DEVICE FOR ELIMINATION OF SKIN DEFECTS.....41

Skakun O.V., Syvoborodko A.V.

OVERVIEW OF PORTABLE MODERN MEASURING EQUIPMENT FOR ENVIRONMENTAL CONTROL.....47

RADIO ENGINEERING AND TELECOMMUNICATIONS

Volovyk A.Yu.

LOCALLY OPTIMAL ROBUST ESTIMATES OF THE LINEAR SYSTEMS STATE WITH INDEFINITE INPUTS.....56

Zahreba A.Ya., Lebedev D.Yu.

DEVELOPMENT OF THE CIRCUIT ENGINEERING SOLUTION FOR A DIGITAL WEATHER CHRONOMETER.....62

Manko O.O., Kunah N.I., Kharlai L.O., Nikiforenko K.B., Konovalov O.Yu., Sotnichenko Yu.O.

PROTECTION OF INPUT CIRCUITS OF MICROWAVE RANGE RADIO RELAY STATIONS RECEIVERS AGAINST POWERFUL IMPULSE INTERFERENCES.....67

Mogylevych D.I., Kononova I.V., Shchyhol Yu.F.

RELIABILITY MODEL OF ELECTRONIC COMMUNICATION NETWORK EQUIPMENT TAKING REFUSALS AND FAILURES INTO ACCOUNT.....74

Pavlov L.M., Yaganov P.O.

OPTIMIZATION OF THE INTEGRAL TEMPERATURE THRESHOLD SENSOR.....80

Prokopets V.A., Globa L.S.

METHOD OF INTERSECTORAL REDISTRIBUTION OF USERS BASED ON DIGITAL TWIN TECHNOLOGY.....87

Saiko V.G., Narytnyk T.M.

APPLICATION OF BLOCKCHAIN SYSTEM FOR SECURE MESSAGING IN HETEROGENEOUS MOBILE NETWORKS OF TERAHERTZ RANGE.....92

Saiko V.G., Narytnyk T.M. MODEL OF FORECASTING OF SYSTEM PARAMETERS OF BLOCKCHAIN SYSTEMS IN HETEROGENEOUS MOBILE NETWORKS OF TERAHERTZ RANGE	98
Saiko V.G., Narytnyk T.M. THREE-DIMENSIONAL MULTILAYER NETWORKS OF TERAHERTZ RANGE.....	104
Semenov A.O., Semenova O.O., Voitsekhovska O.O., Khloba A.A., Ovcharuk A.O. DIAGNOSTIC DEVICE FOR GAS-FILLED DEVICES FOR VISUAL REPRODUCTION OF THE INFORMATION.....	110
Tsiapa S.M. A COMPREHENSIVE METHOD OF PROTECTING THE INFRASTRUCTURE OF THE 5G MOBILE COMMUNICATION NETWORK.....	116

INFORMATICS, COMPUTER ENGINEERING AND AUTOMATION

Boloban O.A., Petrenko A.I. PECULIARITIES OF USING THE EMD ALGORITHM TO ESTIMATE THE LEVEL OF OXYGEN IN THE BLOOD.....	125
Bochok V.O., Fedorova N.V. MULTI-AGENT SYSTEMS AND PROBLEMS OF THEIR OPTIMIZATION.....	131
Galagan R.M., Andreiev S.M., Petryk V.F., Bazhenov V.G., Lysenko L.L. DETECTION OF DEFECTS IN CONCRETE STRUCTURES BASED ON IMAGE ANALYSIS USING CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORKS.....	138
Huz D.R., Shtifzon O.Yo., Novikov P.V., Liubytskyi S.V. ENVIRONMENTAL CONDITION MONITORING SYSTEM BASED ON IOT DEVICE.....	145
Ivohin E.V., Gavrilenko V.V., Ometsynska N.V., Ivohina K.E., Rudoman N.V. ON ONE APPROACH TO SOLVING THE TRAVELING SALESMAN PROBLEM USING THE ORLIN METHOD OF OPTIMIZING DATA FLOWS.....	153
Kandyba I.O., Fisun M.T., Horban H.V., Stepanchuk D.K. GENERATOR OF MULTI-ALPHABETIC SYNTACTIC ANALYZERS WITH GRAPHICAL DISPLAY OF THE SYNTACTIC TREE.....	158
Kravchenko O.S., Demchenko M.O., Voloshko O.V., Filippova M.V. ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF USING RESOURCES IN THE COMPANY USING DIGITAL TWIN.....	164
Kurganov I.D. OPTIMAL CONTROL OF THE DRIVE DRUM OF THE BELT CONVEYOR IN AUTOMATIC SYSTEMS WITH DISTRIBUTED PARAMETERS USING THE PRINCIPLES OF MOBILE CONTROL.....	170
Lisovets S.M., Kiva I.L., Guida O.G., Vyshemirska Ya.S. ORGANIZING ACCESS TO DATA IN SCADA SYSTEMS USING MICROSOFT SQL SERVER.....	175
Makarova L.M., Kaminsky S.S., Bryzgalov M.V. DEVELOPMENT OF SOFTWARE FOR DETECTING CHANGES MADE TO THE CODE OF EXECUTABLE FILES.....	179
Mariash Yu.I., Stepanets O.V., Liubytskyi S.V. METHOD OF IMPLEMENTATION OF MODEL PREDICTIVE CONTROL OF THE BLOWING MODE PARAMETERS OF THE BASIC OXYGEN FURNACE PROCESS IN A PROGRAMMED LOGIC CONTROLLER.....	186
Melnychuk B.P., Shevchenko V.V. A COMPLEX SYSTEM OF CONTROL OF THE PROCESSING OF DEVICE PARTS IN AUTOMATED PRODUCTION.....	193
Muraviov O.V., Dovbysh I.O., Galagan R.M., Bohdan H.A., Momot A.S. DEVELOPMENT PROSPECTS OF TECHNOLOGIES AND INCREASING AUTONOMY LEVEL OF UAV... ..	199
Nevliudov I.Sh., Yevsieiev V.V., Demska N.P., Kostrova H.Yu. DEVELOPMENT AND IMPROVEMENT OF THE DESIGN OF A LIGHTWEIGHT MOBILE ROBOT MANIPULATOR USING GENERATIVE DESIGN.....	206

Pavlov V.G.	
CONTEXTUAL APPROACH IN ANALYZING THE SIMILARITY OF PROGRAM CODES.....	214
Protasov A.G., Storozhyk D.V.	
AUTOMATION TECHNOLOGIES OF ROAD SURFACE DIAGNOSTICS.....	219
Redko I.V., Zylevich M.O.	
REDUCTIVE PROGRAMMING OF PROBLEMS IN A TECHNOLOGICAL PROGRAMMING ENVIRONMENT.....	228
Sarnatskyi V.V., Baklan I.V.	
CTRACEENV: A PLATFORM FOR DEVELOPMENT AND ANALYSIS OF AGENT-BASED EPIDEMIOLOGICAL MODELS USING CTRACE LANGUAGE.....	234
Tkachuk A.H.	
THE ENGINE SELECTION CONCEPT OF A MOBILE ROBOTIC PLATFORM WITH AN AUTONOMOUS STABILIZATION SYSTEM.....	241
Ushakova I.O., Hrabovskiy Ye.M., Bondarenko D.O.	
MODELING AND SELECTION OF A DISTANCE LEARNING SYSTEM FOR A HIGHER EDUCATION INSTITUTION BASEDON THE METHOD OF HIERARCHY ANALYSIS USING THE DSS.....	246
Fedotova M.O., Matsui A.M., Trushakov D.V., Serbul O.M., Berezyuk I.A., Skrynnik I.O.	
TECHNOLOGY OF IDENTIFICATION OF THE DYNAMICS OF A MULTIDIMENSIONAL OBJECT AND ITS APPLICATION.....	255
Chumachenko S.M., Kutovoi O.P., Guida O.G., Popel V.A., Zaika N.V.	
COMPREHENSIVE APPROACH TO DETERMINING THE LEVEL OF SECURITY OF CRITICAL ENERGY INFRASTRUCTURE BASED ON AN INTEGRATED PROTECTION SYSTEM AGAINST UAV AND GUIDED BALLISTIC MISSILES.....	261
POWER ENGINEERING	
Baranyuk A.V., Vorobiov M.V., Kinzerskyi A.	
SIMULATION OF HEAT AND HYDRAULIC CHARACTERISTICS OF HOT-WATER BOILER FOR COMBUSTION OF FUEL PELLETS FROM HARDWOOD.....	268
Bosyi M.V.	
A SIMPLIFIED PHYSICAL AND MATHEMATICAL MODEL OF RESEARCHING THE PROCESS OF GAS HYDRATE FORMATION ON THE SURFACE OF THE GAS-WATER PHASE INTERPRETATION.....	276
Semychayevsky S.V., Samchenko T.V.	
STUDY OF POSSIBLE FIRE SCENARIOS IN MACHINE ROOMS OF NUCLEAR AND THERMAL POWER PLANTS.....	281
Sinchuk I.O., Kotyakova M.G.	
ELECTRICITY QUALITY CONTROL IN THE ASPECT OF IMPLEMENTATION OF MICRO GRID TECHNOLOGY.....	288
Shakhbazov I.O., Siryi O.A.	
PERSPECTIVES OF THE USE OF BIOFUEL IN HOUSEHOLD BOILER INSTALLATIONS.....	293
INFORMATION ABOUT AUTHORS.....	299

ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ У МАШИНОБУДУВАННІ

УДК 621.791.92

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.2.1/01>**Бернацький А.В.**

Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України

Соколовський М.В.

Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України

Сіора О.В.

Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України

Бондарєва В.І.

Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України

Шамсутдінова Н.О.

Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України

МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ, ЩО ВИНИКАЮТЬ ПРИ ЛАЗЕРНОМУ ЗВАРЮВАННІ ТОНКОСТІННИХ СТИКОВИХ З'ЄДНАНЬ БАГАТОКОМПОНЕНТНИХ ЖАРОМІЦНИХ СПЛАВІВ ДЛЯ ВИРОБІВ АЕРОКОСМІЧНОЇ ТЕХНІКИ

При розробці наукових основ і технологічних прийомів лазерного зварювання багатокомпонентних жароміцних сплавів для виробів аерокосмічної техніки повстало завдання моделювання теплових процесів, що виникають при лазерному зварюванні тонкостінних стикових таких сплавів, оскільки фізика протікання процесу зварювання тонкостінних металів кардинально відрізняється від такої в напівбескінечному тілі. Моделювання даних процесів – вкрай складний процес через велику кількість динамічних параметрів, що необхідно обирати індивідуально для кожної конфігурації оброблюваних поверхонь, тому було обрано ряд певних вимог і умовностей, що дають можливість обрахувати дану модель без помилок. Для вирішення цієї проблеми було проведено аналіз світового досвіду моделювання методом скінченних елементів, що показав необхідність виведення серії вимог та умовностей до математичної моделі процесу лазерного зварювання. В результаті було отримано модель зварного з'єднання з повним проваром всієї товщини зварюваних пластин з широким зварним швом та зоною термічного впливу. При розрахунку процесів лазерної обробки важливо врахувати багато факторів, такі як термодинамічний вплив на розміщення рідкої фази у ванні розплаву тощо. При моделюванні лазерної обробки сплаву в напівбескінечному тілі було помічено, що більшість проплавлення матеріалу відбувається через $0,1-0,2c$ після передачі енергії лазерним випромінюванням. Тонкі пластини зі сплаву Nb-15W-5Mo-1Zr (F-48), в силу своїх термодинамічних властивостей, (таких як висока початкова швидкість охолодження в $1,2-1,3 c$), можуть бути зварені обраними режимами лазерної обробки. При цьому необхідно зазначити, що якість зварного з'єднання в даному випадку повинна забезпечуватись комплексом допоміжних виробничих заходів, спрямованих на запобігання браку деталі, що зварюється.

Ключові слова: математичне моделювання, метод скінченних елементів, лазерне зварювання, тонкостінні стикові з'єднання, жароміцні сплави.

Постановка проблеми. Математичне моделювання за допомогою сучасних програмних пакетів – систем автоматичного проектування (САПР) – більш сучасний, точний і візуально зро-

зумілий метод моделювання в порівнянні з класичними розрахунковими методами моделювання фізичних процесів зварювання. Завдання математичного моделювання теплових процесів, що

виникають при лазерному зварюванні тонкостінних стикових з'єднань багатокомпонентних жароміцних сплавів для виробів аерокосмічної техніки є актуальним з причини кардинальної різниці між загальновідомою фізикою протікання процесу зварювання тонкостінних металів від такої у напівбескінечному тілі з безкінечною глибиною, розрахунок якої є вже вирішеним завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Після аналізу світового досвіду з моделювання процесів зварювання близьких матеріалів та конструкцій [1-3] було встановлено, що створення абсолютно точної моделі процесу лазерного зварювання тонкостінного стикового з'єднання є невідповідним у практичних застосуваннях через надвисоку комплексність такої моделі, що встановлює непомірно високі вимоги до розрахункового комп'ютера, а також потребує великої кількості часу для розрахування лічених секунд процесу зварювання. Через це було виведено ряд вимог та умовностей [4], що дозволять створити задовільну модель процесу зварювання тонкостінних деталей, виготовлених з багатокомпонентних жароміцних сплавів. Моделі теплового обміну, створені для цього розрахунку, повинні бути виконані з виконанням певних вимог:

1. Урахування температури кипіння, коефіцієнту відбиття та теплоти випаровування.
2. Урахування нелінійності характеристик матеріалу при розрахунку теплового поля.
3. Урахувати нелінійний зв'язок втрат тепла як головної причини встановлення квазірівноваги у зварювальній ванні.

При цьому, обрано певні умовності для спрощення розрахунку:

1. Модель не враховує деформацію поверхні твердої та рідкої фаз;
2. Не враховується рух рідкого розплаву та перевідбиття лазерного пучка всередині каналу проплавлення.
3. Момент створення ванни розплаву у вигляді каналу проплавлення та парогазового каналу враховується лише частково.

Аналіз різних статей, що оцінюють можливості комплексів САПР, вказують на перевагу пакету САПР COMSOL Multiphysics [1, 3, 5], оскільки даний програмний пакет має широкі можливості для постановки точних умов задачі та дуже великого потенціалу в плані моделювання процесів зварювання, як типових, так і спеціалізованих матеріалів. Моделі враховують нерівномірний рух в початку і кінці зварювального процесу, Гаусівський розподіл теплового потоку по радіусу

лазерної плями та коефіцієнт відбиття, що залежить від температури.

Моделювання процесу зварювання проводили для сплаву Nb-15W-5Mo-1Zr, також відомого як сплав F-48. F-48 – жароміцний ніобієвий сплав, що використовується при виготовленні деталей турбін, реактивних двигунів та атомних реакторів [6-8]. Виготовляються деталі з цього металу частіше за все методами порошкової металургії. Основний робочий діапазон температур для цього сплаву лежить в рамках 800–1400°C. Температура плавлення сплаву Nb-15W-5Mo-1Zr – 2540°C. Хімічний склад даного сплаву наведено в табл. 1.

Таблиця 1
Склад сплаву Nb-15W-5Mo-1Zr.

Елемент	Nb	W	Mo	Zr	C
Масова доля (%)	основа	14,95- 15,2	4,92- 5,07	0,93- 0,98	~0,1

Постановка завдання. Метою роботи є моделювання теплових процесів, що виникають при лазерному зварюванні тонкостінних стикових з'єднань сплаву Nb-15W-5Mo-1Zr при потужності лазерного випромінювання у 400 Вт, а також проведення аналізу теплообміну стикового з'єднання пластин сплаву Nb-15W-5Mo-1Zr та виведення закономірностей теплової складової за допомогою пакету САПР COMSOL Multiphysics.

Виклад основного матеріалу. Моделі було виконано з допомогою фізичного модулю Heat Transfer in Solids (ht) комплексу САПР COMSOL Multiphysics 5.6.0.149. Даний модуль проводить розрахунок теплових процесів при лазерному випромінюванні за математичною моделлю, що базується на законі Стефана-Больцмана, а саме за рівнянням (1):

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u}_{trans} \cdot \nabla T \right) + \nabla \cdot (\mathbf{q} + \mathbf{q}_r) = -\alpha T : \frac{dS}{dt} + Q \quad (1),$$

де:

- ρ – щільність [кг/м³]
- C_p – питома теплоємність при постійному напруженні [Дж/(кг*К)]
- T – абсолютна температура [К]
- \mathbf{u}_{trans} – вектор швидкості поступального руху [м/с]
- \mathbf{q} – тепловий потік за провідністю [Вт/м²]
- \mathbf{q}_r – тепловий потік випромінювання [Вт/м²]
- α – коефіцієнт теплового розширення [1/К]
- S – другий тензор напруг Піоли-Кірхгофа [Па]
- Q – додаткові джерела тепла [Вт/м³]

Тепловий слід даного процесу (Q_1) розраховано з допомогою формули (2), яка враховує Гаусівський розподіл енергії:

$$Q_1 = \text{Laser_power} * (1 - R_c) * 1 / (\pi * \text{beam_radius_x}^2) * \text{Gauss2D}(x, x_0) \quad (2)$$

Параметри режимів обробки, що використовувались в даних експериментах наведено у табл. 2.

Сама модель являє собою дві пластини тіло, яке змодельовано з допомогою крайніх значень (constraints) Thermal Insulation та Heat Flux. Область, що розраховується – дві пластини з габаритами 50×20×0.8 мм. Лазерне випромінювання проходить по стику двох пластин з однорідною швидкістю 300 мм/хв. Газовий захист – відсутній. Для уточнення результатів розрахункова сітка була покращена (Refined) в зоні стику двох пластин. Геометрія моделі представлена на рис. 1.

Таблиця 2

Характеристики модулю Heat Transfer in Solids.

Позначення	Величина	Характеристика
x0	"0 [mm]"	"pulse center x coordinate"
y0	"0 [mm]"	"pulse center y coordinate"
beam_radius_x	51[μm]	"Laser beam radius x direction"
beam_radius_y	51[μm]	"Laser beam radius y direction"
Laser_power	400[W]	"Laser beam total power"
Rc	0.3	"Laser beam reflection coefficient"
Width	50 [mm]	Width
Height	20[mm]	Height
v	300 [mm/min]	"Laser beam travel speed" (швидкість зварювання)
Thickness	0.8 [mm]	Thickness
r_spot	51[μm]	"Laser beam radius"

Очікується отримання моделі теплового розрахунку конвективного типу з рівномірним роз-

поділом теплової енергії. Гаусівський розподіл енергії дотримується по всій площині поверхні, температура на поверхні перевищує температуру плавлення матеріалу. При цьому відомо, що отримані двовимірні форми ванни розплавів не будуть точно співпадати з експериментальними через обрані умовності в розрахунку, оскільки вони не враховують фізичних явищ, які сильно впливають на форму ванни розплаву та, внаслідок цього – зварного шва.

При лазерній обробці сплаву Nb-15W-5Mo-1Zr (F-48) в напівбескінечному тілі було помічено, що більшість проплавлення матеріалу відбувається через 0,1-0,2с після передачі енергії лазерним випромінюванням. Це явно помітно на рис. 2, який показує зріз торця розрахункової зони під час проходження ЛВ через його площину. При цьому даний сплав має яскраво виражену схему конвективного теплообміну, розповсюджуючи теплову енергію горизонтально на 1,1-1,2 мм в обидві сторони, забезпечуючи повний проплав пластини.

В даному випадку температура поверхневих шарів матеріалу досягає матеріалу точки випаровування, підкреслюючи необхідність використання газового захисту.

Коротка довжина зони (як показано на рисунку 3), де температура матеріалу залишається вищою за температуру плавлення (близько 2,0-2,5 мм) – вказує на високу початкову швидкість охолодження сплаву без зовнішніх впливів. Це можна пояснити фізичним складом сплаву.

При цьому можна помітити досить довгу (приблизно 14,8 мм) зону, де температура матеріалу залишається вищою за температури робочого режиму даного сплаву (1500-2200°C), що вказує на швидке

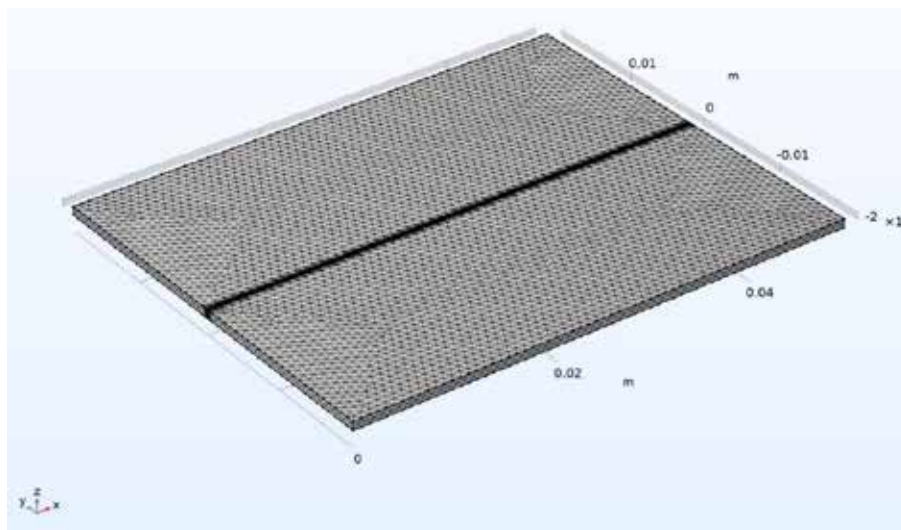


Рис. 1. Геометрія розрахункової моделі експерименту з нанесеною на неї розрахунковою сіткою

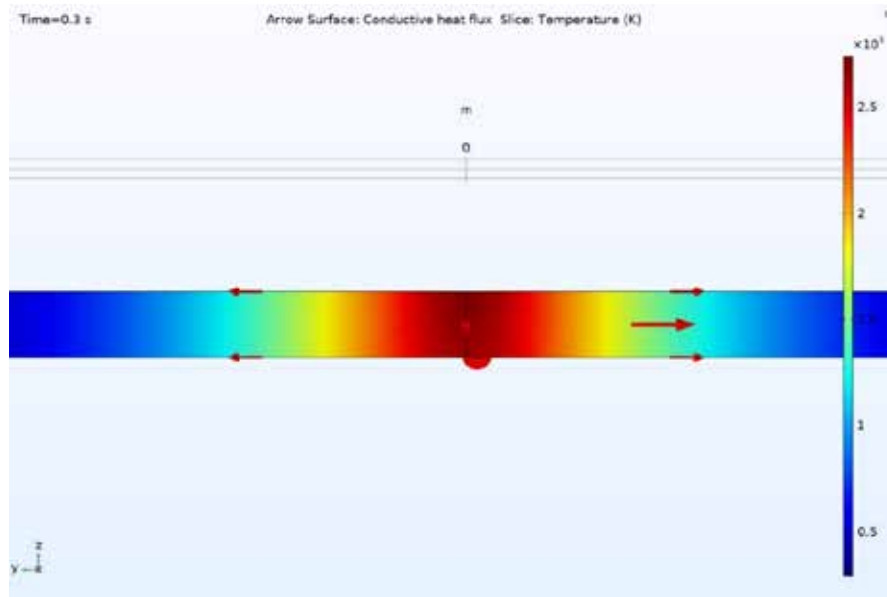


Рис. 2. Схема теплообміну при лазерному зварюванні пластин сплаву Nb-15W-5Mo-1Zr ЛВ потужністю 400 Вт в площині YZ, момент часу 0,3 с

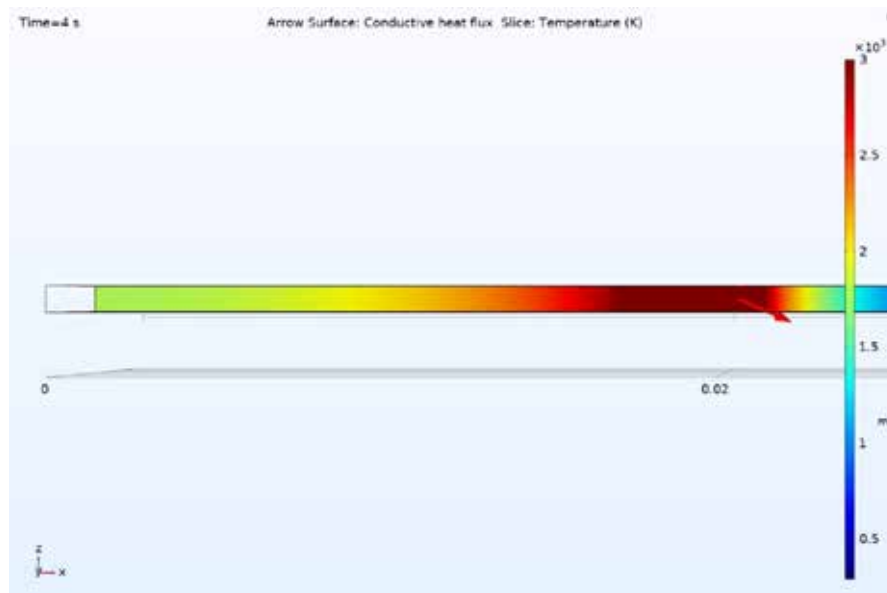


Рис. 3. Схема теплообміну в площині XZ при лазерному зварюванні пластин сплаву Nb-15W-5Mo-1Zr ЛВ потужністю 400 Вт, момент часу 4 с

зниження швидкості охолодження після рекристалізації металу. Однорідність збереження конвективної природи термодинамічної взаємодії процесів при цьому зберігається. При обраних режимах обробки було помічено повний проплав точок тонких пластин через 0-0,1 с після прикладення до даних точок лазерного випромінювання. Більш явна картина в горизонтальній площині, яка спричинена дією лазерного випромінювання в сплаві Nb-15W-5Mo-1Zr, демонструється на рисунках 4 та 5.

Тут можна помітити, що приблизно 65% теплообміну (напрямок якого показано стрілками

на рисунках 4 та 5) відбувається безпосередньо поруч з зоною безпосередньої дії ЛВ. При цьому, через малу товщину матеріалу, основна частина поглинутої теплової енергії переходить в горизонтальну, а не вертикальну площину. Для прямого порівняння результатів розрахунків та даних про швидкість охолодження матеріалу, було сформульовано та наведено графіки температурного розподілу в глибину (рисунки 6 та 7).

Час застигання розплаву складає 1,25-1,3 с. При цьому швидкість охолодження різко знижується до величини $u \sim 200 \text{ }^\circ\text{C/s}$ за 1,4-1,7 секунди після засти-

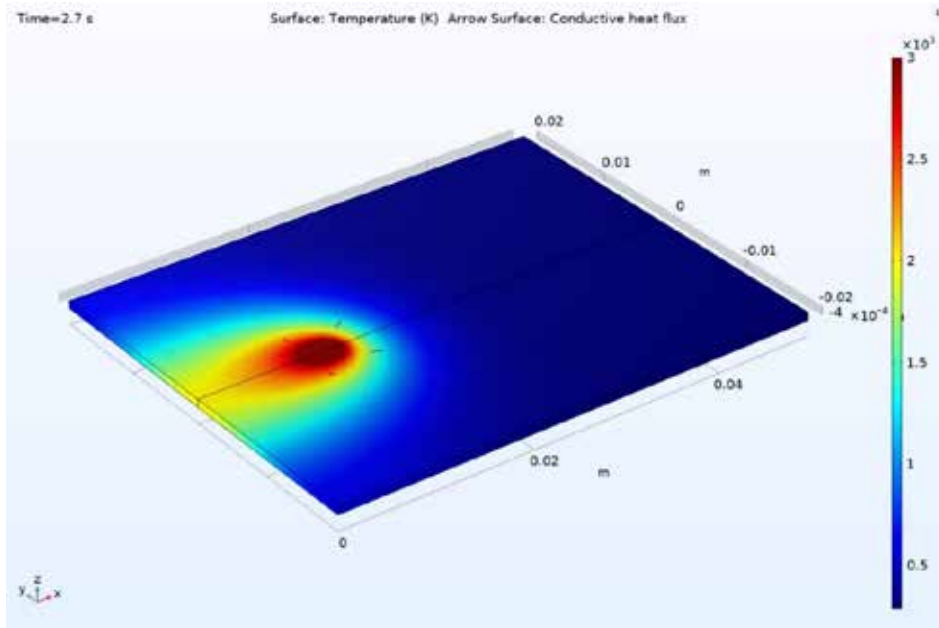


Рис. 4. Тривимірна схема теплообміну при лазерному зварюванні пластин сплаву Nb-15W-5Mo-1Zr ЛВ потужністю 400 Вт, момент часу 2,7 с (верхня сторона)

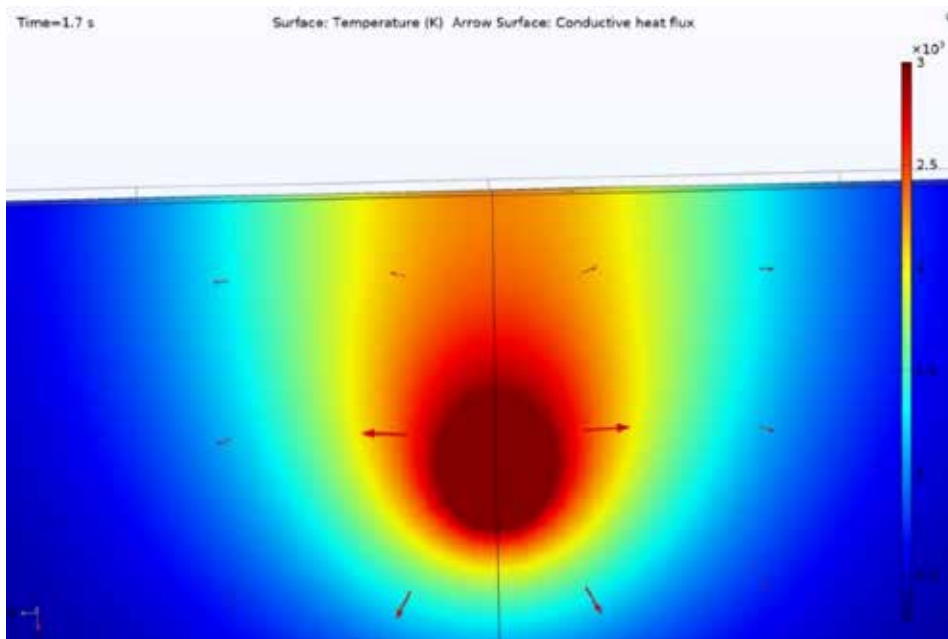


Рис. 5. Тривимірна схема теплообміну при лазерному зварюванні пластин сплаву Nb-15W-5Mo-1Zr ЛВ потужністю 400 Вт, момент часу 2,7 с (нижня сторона)

гання матеріалу. Після цього швидкість охолодження матеріалу знижується ще більше, підкреслюючи необхідність забезпечення охолодження. Наостанок, для виявлення відмінностей у динаміці теплового процесу, було проведено аналіз ізотермічних контурів теплообмінного процесу, що наведено на рис. 8.

При зварюванні стикових з'єднань тонко-стінних пластин з даного матеріалу утворюється

еліпсоподібна ванна розплаву з видовженням у 4,0-5,6 мм та шириною в 2,1-2,3 мм.

Аналіз термодинамічної взаємодії тонких пластин зі сплавом Nb-15W-5Mo-1Zr показав серію залежностей, а саме:

1. При розрахунку процесів лазерної обробки важливо врахувати багато факторів, такі як термодинамічний вплив на розміщення рідкої фази у ванні розплаву тощо.

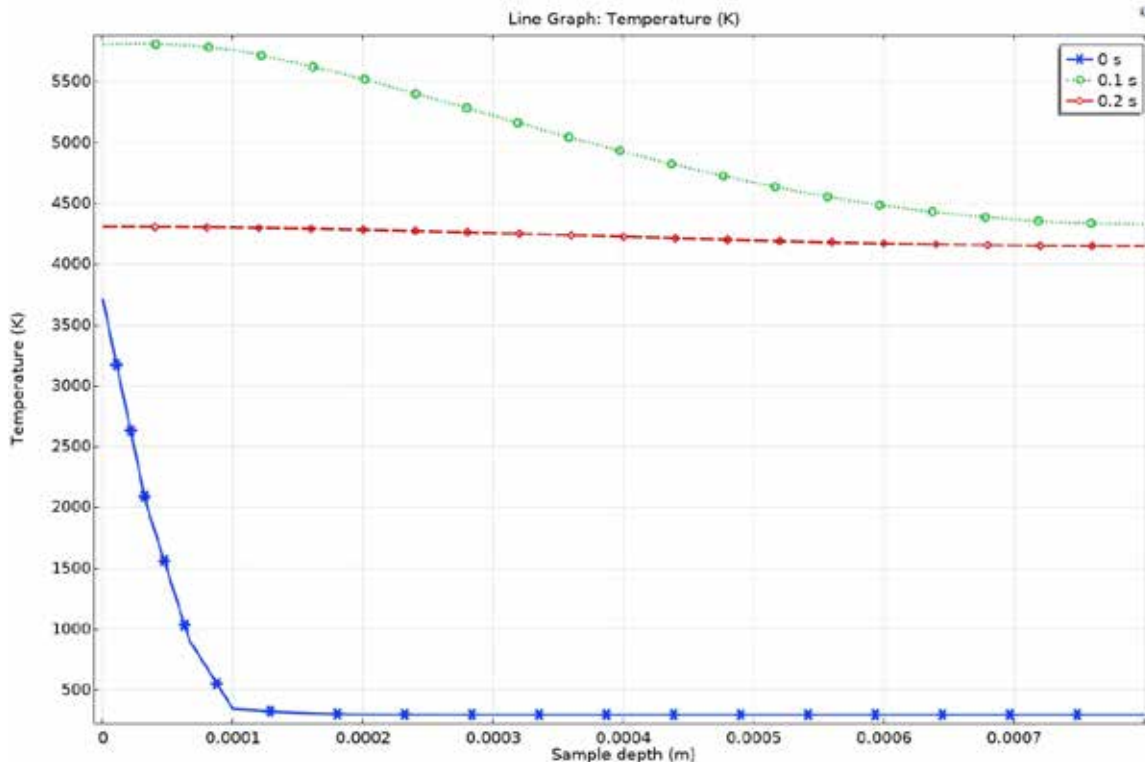


Рис. 6. Графік розподілу температур по площині XZ при лазерному зварюванні пластин сплаву Nb-15W-5Mo-1Zr ЛВ потужністю 400 Вт

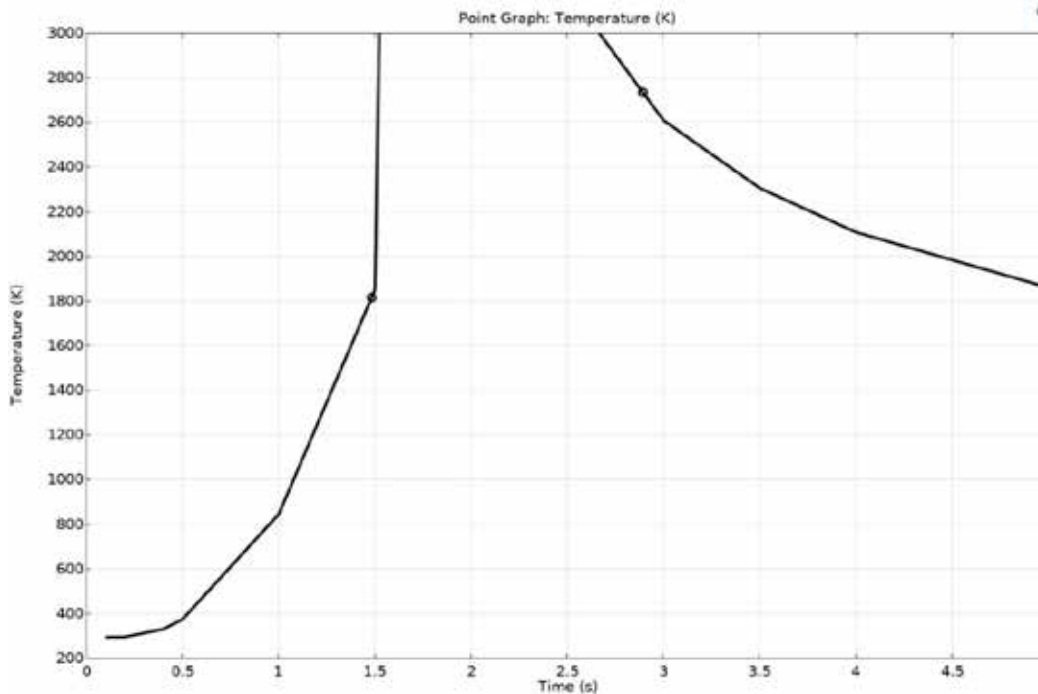


Рис. 7. Графік розподілу температур на поверхні пластини на відстані 10 мм від торця під час лазерного зварювання пластин сплаву Nb-15W-5Mo-1Zr ЛВ потужністю 400 Вт

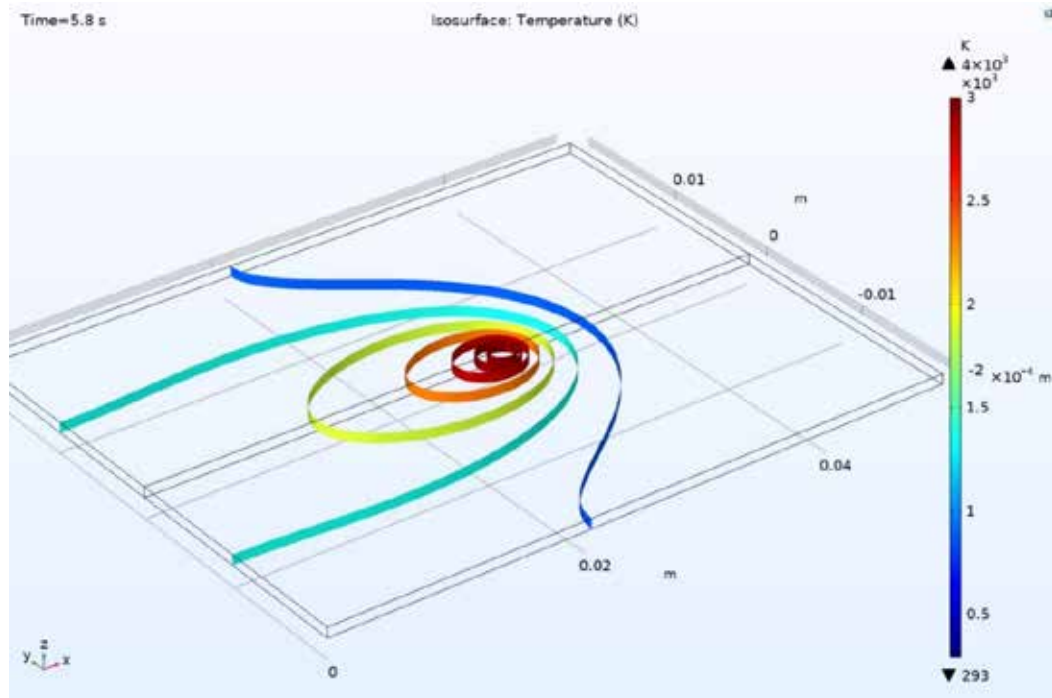


Рис. 8. Ізотермічний контур моментальної ванни розплаву при лазерному зварюванні пластин сплаву Nb-15W-5Mo-1Zr ЛВ потужністю 400 Вт, момент часу 5,8 с

2. Сплав Nb-15W-5Mo-1Zr досить важко оброблюється шляхом лазерної обробки завдяки жароміцному складу, при цьому маючи вищу швидкість охолодження та відносно рівномірний розподіл температур у трьох площинах.

Висновки. Моделювання теплових процесів, що виникають при лазерному зварюванні тонкостінних стикових з'єднань багатокомпонентних жароміцних сплавів – вкрай складний процес через велику кількість динамічних параметрів, що необхідно обирати індивідуально для кожної конфігурації оброблюваних поверхонь. Для забезпечення виконання поставленого завдання було виконано аналіз теплових процесів, а також було створено модель стикового з'єднання тонких пластин з багатокомпонентних металів. В резуль-

таті було отримано модель зварного з'єднання з повним проваром всієї товщини зварюваних пластин з широким зварним швом та зоною термічного впливу.

З результатів моделювання термодинамічної взаємодії даного сплаву при лазерній обробці можна досить впевнено сказати, що обрані режими обробки дають можливість провести лазерне зварювання плит товщиною 0,8-1,2 мм без серйозних змін до характеристик лазерного випромінювання. При цьому висока швидкість охолодження, а також широка ванна розплаву вказує на необхідність проведення достатнього контролю над якістю шляхом захисту зони термічного впливу та використання комплексних технологічних заходів.

Список літератури:

1. A.P. Mackwood, R.C. Crafer. Thermal modelling of laser welding and related processes: a literature review. *Optics & Laser Technology*. 2005. № 35. С. 99–115.
2. Mickael Courtois, Muriel Carin, Philippe LeMasson, Sadok Gaied, and Mikhaël Balabane. A New Approach to Compute Multi – Reflections of Laser Beam in a Keyhole for Heat Transfer and Fluid Flow Modelling in Laser Welding. *Journal of Physics. Applied Physics*. 2013. №50. С. 505305.
3. Lei Wang, Yong Huang, Dongqing Yang, He Li, Yong Peng, Kehong Wang. Multi – scale simulation of grain growth during laser beam welding of nickel – based superalloy. *Journal of Materials Research and Technology, Volume 9*. 2020. № 6. С. 15034–15044.
4. Gusarov, A.V., I. Yadroitsev, Ph. Bertrand, and I. Smurov. Heat Transfer Modelling and Stability Analysis of Selective Laser Melting. *Applied Surface Science*. 2007. № 254. С. 975–979.

5. Mayi Y.A., Dal M., Peyre P., Bellet M., Metton C., Moriconi C., Fabbro R. An Original Way of Using COMSOL® Application Builder to Enhance Multiphysical Simulation of Laser Welding Processes. *COMSOL Technical Papers and Presentations*. 2020. URL: https://www.comsol.com/paper/download/855071/Mayi_paper.pdf
6. Miracle, D.B.; Senkov, O.N. A critical review of high entropy alloys and related concepts. *Acta Materialia*. 2017. №122. C. 448–511.
7. Ghosh P.S., Sen A., Chattopadhyaya S., Sharma S., Singh J., Dwivedi S.P., Saxena A., Khan A.M., Pimenov D.Y., Giasin K. Prediction of Transient Temperature Distributions for Laser Welding of Dissimilar Metals. *Applied Sciences*. 2021. № 11(13). C. 5829.
8. Miracle, D.B.; Miller, J.D.; Senkov, O.N.; Woodward, C.; Uchic, M.D.; Tiley, J. Exploration and Development of High Entropy Alloys for Structural Applications. *Entropy*. 2014. №16. C. 494–525.

Bernatskyi A.V., Sokolovskyi M.V., Siora O.V., Bondarieva V.I., Shamsutdinova N.O.
**SIMULATION OF THERMAL PROCESSES OCCURRING DURING LASER WELDING
OF THIN-WALLED BUTT JOINTS OF MULTICOMPONENT HEAT-RESISTANT
SUPERALLOYS FOR AEROSPACE APPLICATIONS**

During the development of scientific foundations and technological methods of laser welding of multicomponent superalloys for aerospace applications, the task of modeling for thermal processes that occur during laser welding of butt joints for aerospace products arose. This is the case since the physics of the welding process of thin-walled metals are fundamentally different from that in a semi-infinite body with infinite thickness. Modeling these processes is an extremely complex process due to the large number of dynamic parameters that must be individually selected for each configuration of the treated surfaces, therefore a number of certain requirements and conventions were chosen, which make it possible to calculate this model without errors. To solve this problem, an analysis of the global experience of modeling by the finite element method was carried out, which showed the need to select a series of requirements and simplifications for the mathematical model of the laser welding process. As a result, a model of a full penetration welded joint with a wide weld seam and a heat-affected zone was obtained. When calculating laser processing processes, it is important to take into account many factors, such as the thermodynamic effect on the placement of the liquid phase in the melt bath, etc. When modeling the laser processing of an alloy in a semi-infinite body, it was observed that most of the melting of the material occurs after 0.1-0.2s after the transfer of laser radiation energy. Thin plates made of Nb-15W-5Mo-1Zr (F-48) alloy, due to their thermodynamic properties (such as a high initial cooling rate of 1.2-1.3 s), can be welded by selected laser processing modes. At the same time, it should be noted that the quality of the weld in this case must be ensured via employment of an auxiliary production processes set aimed at preventing the failure of the welded part.

Key words: *mathematical modeling, finite element method, laser welding, thin-walled butt joints, superalloys.*

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

UDC 539.3

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.2.1/02>**Petryk V.O.**National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”**Trubachev S.I.**National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”**Kolodezhnyi V.A.**National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

RELIABILITY OF WIRE POTENTIOMETRIC SENSORS USED IN THERMAL POWER INDUSTRY

The article deals with general problems of contact reliability of low-current sliding contacts. Two methods of measuring the value of the contact resistance of a wire potentiometer are presented. According to one of the methods, the value of the contact resistance was measured and the measurement error was calculated.

The ability to measure contact resistance opens up wide opportunities for further research into the reliability of potentiometric sensors. One of the main directions in the research is the wear of the contact pair and how the contact resistance changes. This will make it possible to establish what processes occur in the contact zone, and after studying them, direct research on the management of these processes to achieve long-lasting operation and reliable current conduction in the contact pair. By conducting parallel theoretical studies, it will be known which main parameters affect the wear and conductivity of the friction pair. Similar studies can be carried out in different environments, in the cold, in a humid environment, with vibration, in an environment with different saturation of oxygen, hydrogen, various oils and other components. All these studies are carried out in static conditions after the sensor has worked out the set resource.

Of particular interest is the development of measuring equipment, which should decompose the received signals during one cycle of brush movement along the potentiometer winding, both by the set amplitudes and by time. Establishing information about the interruption of contact over time is of great importance, especially for tracking systems. The creation of such equipment opens up the opportunity to study potentiometric sensors in dynamics. And the probabilistic characteristics obtained at the same time will give a complete idea of the processes taking place in the contact zone.

Key words: reliability, durability, plastic deformations, wear, sensor, contact.

Formulation of the problem. The development of automatic control systems for aircraft largely depends on the reliability of the elements of these systems. In engineering, devices are widely used to measure the magnitude of the displacements of objects with their transformation into electrical signals. The potentiometric sensor in most designs is a rheostat and a sliding contact connected to the object, from which the signal is taken. The output parameter is the value of electrical resistance, depending on the angular or linear displacement of the moving element. The potentiometer converts linear or angular movements

into the corresponding voltage, current or resistance values. Due to this, it is possible to work with many non-electrical quantities: pressure, level, flow, etc.

Potentiometric sensors, the principle of which is to measure the movement or location of the position, are connected by their moving contacts of a variable resistor to objects. These can be valves, antennas, cutting tools and much more. After power is supplied to the sensor, a signal is removed from it, depending on the position of the potentiometer slider, as from a voltage divider.

Wire-wound potentiometric displacement sensors are common in industry. They have high accuracy and

stability, low temperature and transient resistance and low noise level. The disadvantages include: a small amount of resistance, low resolution, wear of moving parts and limited use when operating on alternating current.

Devices consist of three main elements:

- Frame. Made of heat-conducting insulating material or metal with a dielectric coating, does not change geometric dimensions when heated. The shape can be in the form of a ring, a curved plate, a rod.

- Insulated winding. It is carried out with precise laying of the wire, on the pitch of which the resolution of the device depends.

- Movable brush. In places of collision with the winding, the turns are cleaned of insulation. The moving contact in the devices can move translationally or rotationally. In the latter case, the devices can be single or multi-turn.

Wire-wound potentiometric displacement sensors are common in the industry. They have high accuracy and stability, low temperature and transient resistance and low noise level. The disadvantages include: a small amount of resistance, low resolution, wear of moving parts and limited use when operating on alternating current.

The potentiometric position sensor is designed for the following purposes:

- control and measurement of movements of mechanisms, working bodies of machines and other objects;
- feedback link in robotics and automation systems;
- determination of distances to objects;
- testing in laboratories, control of the operation of mechanisms.

Thus, the potentiometric sensor is designed to issue an electrical signal depending on the mechanical movement of the current collector brush, and consists of an insulated frame with a winding, a high-resistance wire and a current collector brush.

The voltage taken from the potentiometer functionally depends on the movement of the current-collecting brush along the wire winding. This dependence can have laws: linear, sinusoidal, logarithmic, stepped, etc.

In the closed state, the work of a fixed contact does not differ from a movable one, therefore everything connected with the work of a fixed contact can be attributed to a sliding one.

The reliability of wire-wound potentiometric sensors (WPC) is little reflected in the literature, it is mainly quantitative and does not affect the causes of failures much. WPC are the last link in the signal

output system of the device, and therefore the accuracy of the devices depends on the characteristics of the potentiometric sensors.

Analysis of recent research and publications.

The specificity of a sliding contact is a change in the contact area, and this is a change in the conditions for the passage of current. When sliding, plastic deformation of the surface layer occurs, the activation of physical and chemical processes on the contact surface increases, the quality of the layer changes, its interaction with the environment changes, its conductivity properties change [1]. According to the author of [5], the area increases according to the law

$$1 + \alpha f^2 \left(\frac{A}{A_0} \right),$$

where A_0 – fixed contact area,

A – sliding contact area,

f – coefficient of friction,

α – empirical coefficient.

There is no fritting process in low current sliding contacts. The voltage must be sufficient to melt one or two conjugated metals - then the breakdown of the film and the retraction of the liquid metal into the formed channel. This is possible for fixed contacts, but in low-current sliding contacts with relative movement of the contact surfaces, this is unlikely.

Setting the task. In connection with the development of expensive aircraft, the failure of which is costly, the requirements for the reliability of potentiometric sensors have increased. This forced contact pairs to be made from noble metals such as gold, palladium, platinum, silver, as well as coatings based on these metals.

Detailed information about the properties of contact materials for potentiometric sensors has been considered by many authors. Several meetings on electrocontact materials were devoted to these issues.

Presentation of the main material. We carried out experiments on contact pairs: PdIr-10–AuCu-800, PdW-20–AuCu-800; palladium-iridium and palladium-tungsten windings, gold-copper brush.

These contact materials practically do not oxidize under static conditions at normal temperature.

When studying the sliding contacts of these pairs, it was found that there is a dynamic oxidation with the formation of a film that prevents the passage of current. The presence of this film is controlled by the contact resistance.

After winding a high-resistance wire on an insulating frame, the process of attaching this wire to the frame follows, for which the frame with the wire is impregnated by immersing the frame with the wire in insulating varnish or heated epoxy to a certain depth. Capillary

forces also impregnate the rest of the height of the frame, fill the interturn space in the area of the treadmill, falling on the treadmill itself, which causes the inevitability of stripping the treadmill from the insulator.

In potentiometers, the processing of the contact track is most often carried out by the hydroabrasive method or with a felt washer with GOI paste. Surface treatment in one way or another should take into account not only obtaining a high class of surface cleanliness [1], but, more importantly, to establish how the treatment method affects the physical properties of the surface layer. Polishing of the contact surface is accompanied by an intensive process of absorption of the atoms of the environment, and most of all oxygen.

When the surface is polished, plastic deformation of the upper layers of the wire occurs, which at some stage of polishing makes the surface loose and then smooth due to roughness, and during this period the surface is activated to interact with oxygen.

The surface, thus, being polished, is saturated with oxygen, and when working with dynamic oxidation, the contact zone is double saturated with oxygen - from the environment and from the metal structure. The metal gives off previously saturated oxygen.

Therefore, a conclusion arises.

Any machining of the contact zone for potentiometric transducers is detrimental to current flow.

It is known [2, 3, 4] that to increase the service life of potentiometers in the contact zone of the brush with the winding in secondary structures, the presence of an oxide film is necessary. It is a separating medium in the contact pair, prevents the process of setting of juvenile surfaces, while increasing the service life, however, this service must be reliable in terms of the absence of contact losses (up to 2 milliseconds).

The main characteristic of contact reliability is the contact resistance R_c .

In potentiometric sensors, this is the resistance between the high-ohm winding wire and the contact brush. There is a need to measure the contact resistance.

This is dictated by the ever-increasing requirements for improving the reliability of potentiometers. The value of contact resistance can be represented as the sum of two resistances [1]:

$$R_c = R_f + R_r .$$

First component R_f caused by surface films, the second component R_r - the presence of irregularities on the metal surface.

The value of the contact resistance makes it possible to establish the relationship between the physical properties of the contacted materials, the geometric shape of the contact surface and the contact force. The measurement of the contact resistance of

two conductors, for example, between the contacts of a relay and the contacts of other electrical devices, is usually carried out using bridges or compensators and does not present significant difficulties [7].

Measuring the contact resistance between the brush and the turns of the potentiometer winding presents significant difficulties, since the total resistance of the potentiometer can be tens or more ohms.

To measure the contact resistance in this case, sometimes they resort to taps from a coil or a group of turns, and then measure the resistance between the brush and the taps using bridges or ohmmeters [6]. Naturally, such a measurement method is laborious and cannot provide high measurement accuracy.

In this paper, we propose two methods for measuring contact resistance in contacts on a finished potentiometer using a DC compensator. The scheme of measurements according to the first method is shown in Fig. 1.

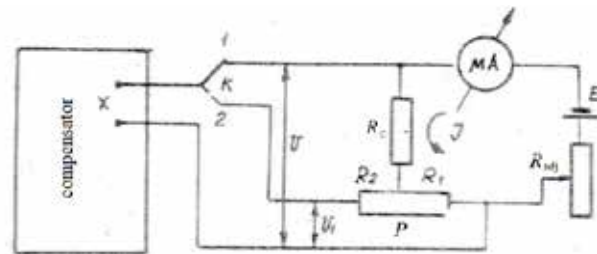


Fig. 1. Schematic diagram of the installation:
 P – potentiometer, R_{adj} – resistor to adjust the current in the circuit, mA – milliammeter, E – DC source, R_c – contact resistance between brush and potentiometer winding

Since the resistance values R_c and R_1 for a given measurement and a certain position of the brush on the potentiometer winding are constant, then the accuracy of determining the value of the contact resistance will depend on the constancy and accurate determination of the current I .

The principle of determining the contact resistance according to the first method is as follows. First key position « K » voltage drop is measured U on resistance R_c and R_1 :

$$U = I (R_c + R_1) .$$

Current I set by adjusting resistance R_{adj} . In the second position of the key « K » voltage drop is measured U_1 on resistance R_1 :

$$U_1 = IR_1 .$$

In this case, the contact resistance

$$R_c = (U - U_1) / I .$$

The current in the circuit is set taking into account the permissible current value for a given wire potentiometer.

On Fig. 2 shows a diagram for measuring the contact resistance between the brush and the turns of the potentiometer winding according to the second method.

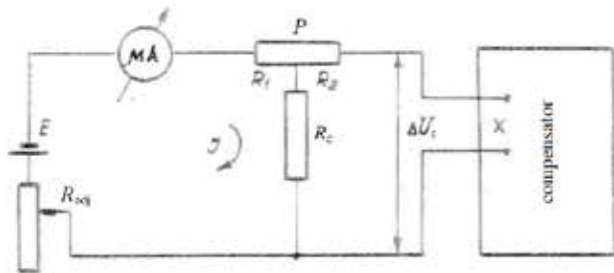


Fig. 2. Scheme for measuring contact resistance according to the second method

Contact resistance value R_c according to the proposed method is determined by the magnitude of the voltage drop $\Delta U_c = IR_c$, which is measured by the DC compensator. The current strength is set by milliammeter «mA» depending on requirements.

Thus, the value of the contact resistance

$$R_c = \Delta U_c / I .$$

Resistance value R_1 and R_2 does not affect the measurement of contact resistance, since R_1 enters the contact circuit, and on R_2 practically no voltage drop. To show by example the use of this circuit, the contact resistance between the brush and the winding was determined «rough» potentiometer (outside accuracy class) with total resistance $R_1 + R_2 = 480 \Omega$.

The measurement data for an arbitrary value of the current strength in the contact circuit at various points of the potentiometer are given in Table 1.

Table 1

Measurement results

Current strength I, A	$\Delta U_c, V$	R_c, Ω
$15 \cdot 10^{-2}$	$8,1 \cdot 10^{-4}$	$5,34 \cdot 10^{-3}$
$14 \cdot 10^{-2}$	$6,0 \cdot 10^{-4}$	$4,28 \cdot 10^{-3}$
$13 \cdot 10^{-2}$	$5,0 \cdot 10^{-4}$	$3,84 \cdot 10^{-3}$
$11 \cdot 10^{-2}$	$4,0 \cdot 10^{-4}$	$3,65 \cdot 10^{-3}$
$8,0 \cdot 10^{-2}$	$2,0 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$

In this method, the measurement error is determined by the accuracy class of the milliammeter and the errors of the compensator. So, for the fifth measurement (Table 1), the error in measuring the current strength is

$$\gamma_a = \pm 0,1 \cdot (15 \cdot 10^{-2}) / (8 \cdot 10^{-2}) \approx \pm 0,2\% ,$$

absolute error of determination ΔU_c compensator is determined by the formula

$$\Delta U = \pm (150U + 0,5m) \cdot 10^{-6} , V,$$

where $U \approx \Delta U_c$ – instrument reading,
m – number of decades, whose reading is not equal to zero,

$$\Delta U = \pm (150 \cdot 2 \cdot 10^{-4} + 0,5 \cdot 1) \cdot 10^{-6} = \pm 0,53 \cdot 10^{-6} V.$$

Relative error

$$\gamma_r = \pm (\Delta U / \Delta U_c) \cdot 100\% = 0,2\% .$$

Total error in determining R_c

$$\gamma = \gamma_a + \gamma_r \leq \pm 0,4\% .$$

Conclusions. Knowing the schemes for measuring contact resistance, it is possible to study the physical properties of contact surfaces for various materials, observe the geometric shape of the contact surface and, most importantly, how these parameters change with a change in contact force.

Bibliography:

1. Petryk V., Trubachev S., Alekseichuk O. Contact resistance in low-current sliding contacts. *Інформаційні системи, механіка та керування*. 2011. № 6. С. 69-74.
2. Nan C.-W., Weng G. Theoretical approach to effective electrostriction in inhomogeneous materials. *Phys. Rev.* 2000. Vol. 61. P. 258-265.
3. Безвесільна О. М. Елементи і пристрої автоматики та систем управління. Перетворюючі пристрої приладів та комп'ютеризованих систем : підручник. Житомир : ЖДТУ, 2008. 704 с.
4. Безвесільна О. М., Подчашинський Ю. О. Технологічні вимірювання та прилади. Перетворюючі пристрої приладів та комп'ютеризованих систем : підручник. Житомир : ЖДТУ, 2006. 560 с.
5. Гордов А. Н., Стадник Б. И., Бычковский Р. В. и др. Приборы для измерения температуры: справочник. Львов : Наукова думка, 1986. 348 с.
6. Сущенко О. А., Карасев С. В. Обзор современного состояния микроэлектромеханических датчиков угловой скорости и тенденции их развития. *Електроніка та системи управління*. 2011. № 1(27). С. 103-108.
7. Грановский В. А., Сирая Т. Н. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях. Л.: Энергоатомиздат, 1990. 288 с.

Петрик В.О., Трубочев С.І., Колодежний В.А. НАДІЙНІСТЬ ДРОТЯНИХ ПОТЕНЦІОМЕТРИЧНИХ ДАТЧИКІВ, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ В ЕНЕРГОМАШИНОБУДУВАННІ

У статті розглядаються загальні проблеми надійності контактування слаботочних ковзних контактів. Наведено два методи вимірювання величини контактної опору дротяного потенціометра.

За одним з методів проведено вимірювання величини контактного опору і підраховано похибку вимірювання.

Уміння вимірювати контактний опір відкриває широкі можливості подальшого дослідження питань надійності потенціометричних датчиків. Одним з основних напрямків у дослідженні є зношення контактної пари і як при цьому змінюється контактний опір. Це дозволить встановити, які процеси відбуваються в зоні контакту, а вивчивши їх, направляти дослідження з управління цими процесами для досягнення довговічного в роботі і надійного в провідності струму в контактній парі. Проводячи паралельно теоретичні дослідження, буде відомо, які основні параметри впливають на зношення і провідність пари, що треться. Подібні дослідження можна проводити в різних середовищах, в холоді, у вологому середовищі, при вібрації, у середовищі з різною насиченістю кисню, водню, різних олій та інших компонентів. Всі ці дослідження проводять у статичних умовах після відпрацювання датчиком встановленого ресурсу.

Особливий інтерес представляє розробка вимірювальної апаратури, яка повинна розкласти отримані сигнали за один цикл руху щітки по обмотці потенціометра як за встановленими амплітудами, так і за часом. Встановлення інформації про переривання контакту за часом має велике значення, особливо для слідкуючих систем. Створення такої апаратури відкриває можливість досліджувати потенціометричні датчики в динаміці. А отримані при цьому імовірнісні характеристики дадуть повне уявлення про процеси, що відбуваються в зоні контактування.

Ключові слова: надійність, довговічність, пластичні деформації, зношення, датчик, контакт.

UDC 539.3

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.2.1/03>

Petryk V.O.

National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

Trubachev S.I.

National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

Kolodezhnyi V.A.

National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

RESEARCH OF CONTACT RESISTANCE IN HEAT-RESISTANT PRECISION POTENTIOMETERS

Theoretical and analytical studies of low-current sliding contacts (LSC) using the example of wire-wound potentiometers is a complex task associated with two main conflicting factors that determine success in research.

If in purely mechanical nodes studies are carried out on the contact of rubbing surfaces, then the durability of the assembly is the determining factor. When considering the SSC, this will not be enough. The second important factor is electrical conductivity, moreover, reliable, where this concept means acceptable rates of change in contact resistance both in magnitude and duration. These two norms can disable the tracking system, and it, in turn, can lead to disaster.

Thus, in LSK, two main factors determine the reliability of the node - this is the maximum durability and conductivity within the specified norms. These two factors are contradictory: to increase the service life in the rubbing surfaces, there must be a separator that does not allow the contact of juvenile surfaces, during which an unacceptable setting process occurs, leading to intense wear. The separator can be a natural oxide film or an artificial lubricant. Artificial lubrication is unacceptable, and if we talk about conductive, then due to the short circuit of the turns on the winding, it is also unacceptable. We can only talk about the natural oxide film.

In order to improve the conductivity in LSC, the industry was forced to move from unreliable contact pairs with the participation of nichromium to precious metals and their alloys. The researchers directed their efforts to the theoretical study of conductivity in the LSC, confirming their conclusions with the results of experiments.

Our theoretical studies are reduced to the presentation of a mathematical model of contact resistance, according to which an analytical expression is compiled that determines the dependence of contact resistance on force. The calculated data of the induced parameters for various contact forces are summarized in the table.

In addition, the dependence of the resistance of the oxide film on the force has been experimentally established. This dependence clearly indicates the zone of optimal effort for the pair in question, the zone where there is a separating medium for the contact pair, and studies have shown that this film breaks through the tunnel effect, maintaining reliable contact.

Key words: contact resistance, contact force, reliability, friction, wear, potentiometer.

Formulation of the problem. It is known that potentiometers, as a rule, mean resistors with a movable tap-off contact (motor). A feature of the potentiometer is that the electrical energy in it turns into thermal energy and dissipates. According to the constancy of the resistance value, potentiometers are divided into constant, variable and special ones. Permanent potentiometers (adjustment resistors) have a fixed resistance that is not regulated during operation. Variable potentiometers (variable resistors) are potentiometers whose resistance can be changed by mechanical action on the regulating body.

The resistance of special potentiometers changes under the influence of external factors: flowing current or applied voltage (varistors), temperature (thermistors), illumination (photoresistors), etc. According to the type of resistive element, all potentiometers are divided into wire and non-wire. In wire potentiometers, the resistive element is a wire made of an alloy with a high specific resistance, wound on a special dielectric frame. Non-wire potentiometers can be membrane and volumetric. Film potentiometers have a resistive element in the form of a conductive film applied to the side surface

of a ceramic dielectric base. Contact caps with wire leads welded to them are put on the end of the ceramic cylinder. Outside, the potentiometer is covered with a protective enamel coating.

When choosing a potentiometer, it should be borne in mind that the maximum voltage that can be applied to the resistor should not exceed the voltage determined by its thermal regime and calculated on the basis of the nominal dissipation power (for the nominal resistance and tolerance). To increase the resistance of the potentiometer, a resistive film is applied to the surface of the ceramic cylinder in the form of a spiral. In volumetric potentiometers, the resistive element is made in the form of a volumetric body made of a material with a high specific resistance, which is located inside a glass-ceramic tube with a rectangular section. The wire leads are pressed directly into the resistive element. Films of pyrolytic carbon (carbonaceous potentiometers), metals and their alloys (metal-film potentiometers), metal oxides (metal-oxide potentiometers) or a mixture of metallic and dielectric phases (metal-dielectric potentiometers) are used as the material of the resistive element in non-wire potentiometers), as well as films and volumetric bodies consisting of a mechanical mixture of a powdered conductor with its binding dielectric (composite potentiometers).

Heat-resistant precision potentiometers belong to low-current sliding contacts. It is known that in these contacts, the processes caused by friction and wear prevail over all other processes, even over the current flow processes [5, 7, 9].

Researchers [1, 2, 5] believe that the fact of the transfer of electrons from one contact surface to another additional resistance, and the main conductivity mechanisms of electrical contacts are ohmic conductivity and conductivity through the tunnel effect. Ohmic resistance arises in the contact of metal surfaces as a result of a significant narrowing of the conductor at the point of contact and a decrease in the area of actual contact due to the roughness of the surface. At the same time, the current lines do not pass over the entire apparent surface of the contact spot, but are drawn to the contact spots. Tunnel conductivity is the conductivity of the oxide film. In this case, the general expression of the contact resistance is represented by the expression

$$R_c = R_f + R_{tr},$$

where the first component is determined by the conductivity through the tunneling effect, the second – by the ohmic conductivity [2, 4].

Analysis of recent research and publications. Among a large number of theoretical representations

of the nature of the transient resistance, the following works can be distinguished [3-5], in which the transient resistance is presented as a constriction resistance:

$$R_{up} = \rho / (2\alpha),$$

where ρ – contact material resistivity, α – contact surface radius. In works [6-8], the transient resistance is presented as the resistance of microprotrusions:

$$R_{id} = 2\rho h / \sqrt{A \cdot A_r},$$

where h – microprotrusion height, A – nominal contact area, A_r – actual contact area.

Setting the task. Combining both types of conductivities, we get a complete picture of the nature of the contact resistance of contacts.

Based on the latest theoretical concepts of the nature of the transient resistance, a model of electrical contact was compiled (Fig. 1).

The expression for the conductivity of an electrical contact can be represented as follows:

$$\frac{1}{R_c} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{R_{1up i}} + \frac{1}{R_{1id i}} + \frac{1}{R_{f i}} + \frac{1}{R_{2id i}} + \frac{1}{R_{2up i}} \right). \quad (1)$$

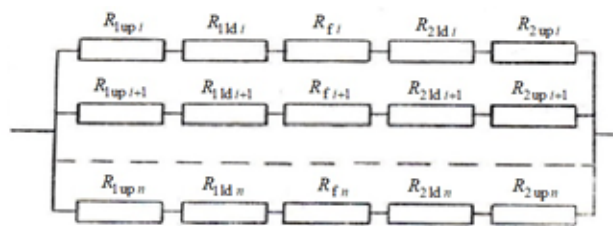


Fig. 1. Contact resistance model

Expression (1) takes into account the pulling resistance R_{up} and microprotrusions R_{id} both surfaces, and the resistance of the film R_f – as the sum of the two surfaces.

Presentation of the main material. If we represent the resistance of microprotrusions as [6-8]

$$R_{id i} = R_{up i}(r, h) + R_{up i}(\infty, 0),$$

where $R_{up i}(r, h)$ – contraction resistance taking into account the influence of the microgeometry of the contact surfaces, characterized by the radius of curvature of the protrusions r and ledge height h , $R_{up i}(\infty, 0)$ – contraction resistance without taking into account the influence of the microgeometry of the contact surfaces, that is at $r \rightarrow \infty$ and $h \rightarrow 0$, then the resistance of the microprotrusions will be equal to

$$R_{id} = \frac{\rho \sqrt{h}}{4a(\sqrt{2r-h} - \sqrt{h})}.$$

Then the contact resistance can be represented by the expression

$$R_{id} = \frac{\rho n}{2a} + \frac{\rho\sqrt{h}}{4a(\sqrt{2-h}-\sqrt{h})} + R_f, \quad (2)$$

where n – number of contact areas, R_f – oxide film resistance.

When a contact brush of the "flycatcher" type moves along the resistance winding, the contact geometry can be represented as a contact of intersecting cylinders, for which the radius of the contact spot, according to Hertz's theory, is expressed by the dependence

$$a = \alpha \sqrt[3]{\frac{PD_1D_2}{D_1 + D_2} \left(\frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \right)},$$

where P – contact force, α – coefficient depending on the ratio of the contacting diameters D_1/D_2 [3].

We consider the contact of surfaces in one area, that is $n = 1$, then $a = r$.

For the case of intersecting cylinders, the actual contact area can be represented as $A_r = \pi ab$, where a and b – semi-axes of the ellipse formed by the contact of the contact surfaces, related by the coefficient β how $b = \beta a$, β – coefficient that takes into account the deviation of the actual area from the circumference, its values depend on the ratio D_1/D_2 and are presented in the handbook [4-6].

The currently existing method for determining the resistance of the oxide film is not applicable in this case, since it has the complexity of analytical calculations and the absence in the literature of the values of a number of parameters included in the calculation formulas for the materials under study (palladium-tungsten windings, gold-copper brush).

We have found a way out of this situation by determining the dependence of the resistance of the oxide film on the force $R_f = f(P)$ (experimental) (Fig. 2).

Using expression (2), we will calculate the dependence of the contact resistance R_c from effort in contact P and compare it with the dependence obtained experimentally (Fig. 3).

The calculated data are given in Table. 1.

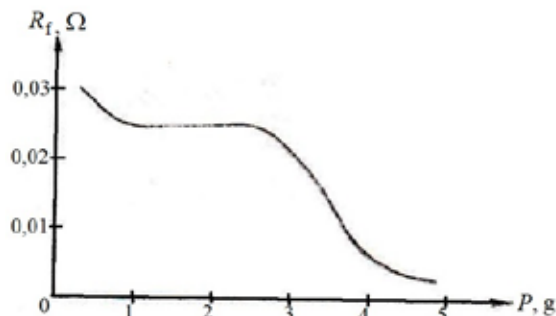


Fig. 2. The dependence of the resistance of the oxide film on contact force

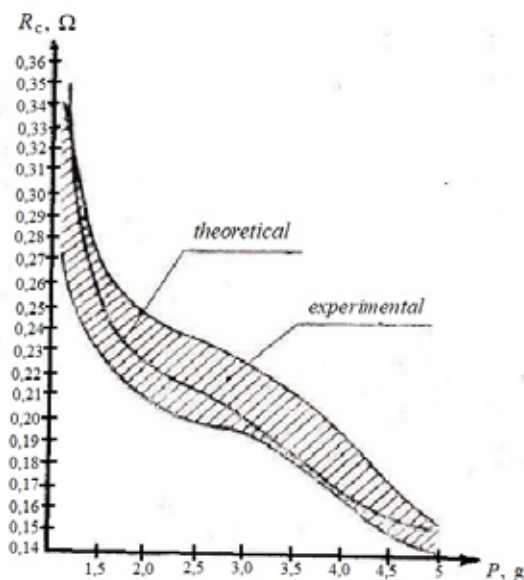


Fig. 3. Dependence of contact resistance on force in contact

Table 1

Estimated data

An effort P, g	a, mm	b, mm	R_{exp}, Ω	R_{theor}, Ω	R_f, Ω	A_r, mm^2
0,5	$0,162 \cdot 10^{-2}$	$0,124 \cdot 10^{-2}$	0,26–0,33	0,3506	0,028	$0,06 \cdot 10^{-4}$
1,0	$0,205 \cdot 10^{-2}$	$0,150 \cdot 10^{-2}$	0,24–0,30	0,28	0,025	$0,1 \cdot 10^{-4}$
1,5	$0,234 \cdot 10^{-2}$	$0,179 \cdot 10^{-2}$	0,22–0,27	0,25	0,025	$0,13 \cdot 10^{-4}$
2,0	$0,258 \cdot 10^{-2}$	$0,197 \cdot 10^{-2}$	0,21–0,24	0,23	0,025	$0,159 \cdot 10^{-4}$
2,5	$0,287 \cdot 10^{-2}$	$0,220 \cdot 10^{-2}$	0,20–0,23	0,208	0,025	$0,195 \cdot 10^{-4}$
3,0	$0,299 \cdot 10^{-2}$	$0,225 \cdot 10^{-2}$	0,19–0,22	0,2	0,0225	$0,208 \cdot 10^{-4}$
3,5	$0,310 \cdot 10^{-2}$	$0,237 \cdot 10^{-2}$	0,17–0,21	0,1826	0,014	$0,23 \cdot 10^{-4}$
4,0	$0,320 \cdot 10^{-2}$	$0,245 \cdot 10^{-2}$	0,16–0,19	0,168	0,005	$0,246 \cdot 10^{-4}$
4,5	$0,340 \cdot 10^{-2}$	$0,258 \cdot 10^{-2}$	0,15–0,17	0,159	0,004	$0,274 \cdot 10^{-4}$
5,0	$0,349 \cdot 10^{-2}$	$0,267 \cdot 10^{-2}$	0,14–0,16	0,153	0,004	$0,293 \cdot 10^{-4}$

Conclusions. Comparing the theoretical dependence with the experimental one, we can say that the theoretically calculated contact resistance is in the range of experimental values.

The initial part of the curve calculated by formula (2) is in worse agreement with the experimental data. This can be explained by the fact that when deriving the basic equation, all factors affecting the conductivity of the electrical contact were not taken into account,

and the current density providing a point breakdown of the oxide film was not taken into account.

By the value of contact resistance, in addition, it is possible to determine the height of microprotrusions h , thereby determining the class of surface cleanliness.

With a steady contact resistance, the height of the microprotrusions corresponds to the 9-th class of surface cleanliness, which is optimal for heat-resistant precision potentiometers.

Bibliography:

1. Petryk V., Trubachev S., Alekseichuk O. Contact resistance in low-current sliding contacts. *Інформаційні системи, механіка та керування*. 2011. № 6. С. 69-74.
2. Petrik V., Trubachev S., Alekseichuk O. Reliable of sliding contacts of potentiometric sensors used in aviation. *Інформаційні системи, механіка та керування*. 2011. № 7. С. 41-46.
3. Елементна база радіоелектронних апаратів : метод. вказівки / уклад. В. П. Войтенко, А. С. Ревко. – Чернігів : ЧНТУ, 2015. 76 с.
4. Матвійків М. Д., Когут В. М. Елементна база електронних апаратів : підруч. Львів : Вид-во Нац. ун-ту "Львівська політехніка", 2007. 427 с.
5. Панікарський О. С., Воробйов Д. О. Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка. Харків : ХНАДУ, 2009. 152 с.
6. Кубата В. Г., Лубенец С. В., Фролов В. Я. Спеціалізовані електронні системи АТЗ : навч. посіб. Харків : ХНАДУ, 2011. 272 с.
7. Будіщев М. С. Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка : підручник. Львів : Афіша, 2001. 424 с.
8. Колонтаєвський Ю. П., Сосков А. Г. Промислова електроніка та мікросхемотехніка: теорія і практикум : навч. посіб. / за ред. А. Г. Соскова. Київ : Каравела, 2004. 432 с.
9. Електроматеріали. Пасивні елементи засобів радіозв'язку та захисту інформації : навч. посіб. / С. В. Толюпа та ін. Київ : ДУТ, 2015. 193 с.
10. Будник А.Ф., Юскаєв В.Б. Фізика та механіка трибодизайну матеріалів : навч. посіб. Суми : Вид-во СумДУ, 2008. 203 с.

Петрик В.О., Трубачев С.І., Колодежний В.А. ДОСЛІДЖЕННЯ КОНТАКТНОГО ОПОРУ В ПОТЕНЦІОМЕТРАХ ТЕПЛІСТИЙКИХ ПРЕЦИЗІЙНИХ

Теоретичні та аналітичні дослідження слаботочних ковзних контактів (ССК) на прикладі дротяних потенціометрів є складним завданням, пов'язаним з двома основними суперечливими факторами, що визначають успіх у дослідженнях.

Якщо в суто механічних вузлах проводять дослідження по контактному зіткненню тертьових поверхонь, то довговічність вузла є визначальним фактором. При розгляді ССК цього буде недостатньо. Другим важливим фактором є електрична провідність, причому надійна, де під цим поняттям мають на увазі допустимі норми зміни контактної опору як за величиною, так і за тривалістю. Ці дві норми можуть вивести з ладу систему, що слідкує, а це, у свою чергу, може призвести до катастрофи.

Таким чином, в ССК два основних фактори визначають надійність вузла - це максимальна довговічність і провідність у межах заданих норм. Ці два фактори суперечливі: для збільшення терміну служби в тертьових поверхнях повинен бути роздільник, що не допускає зіткнення ювенільних поверхонь, при якому відбувається неприпустимий процес схоплювання, що призводить до інтенсивного зносу. Роздільником може бути природна окисна плівка або штучне мастило. Штучне змащення неприпустиме, і якщо говорити про струмопровідність, то через замикання витків на обмотці - теж недопустиме. Мову можна вести тільки про природну окисну плівку.

Для підвищення показників провідності ССК промисловість змушена була перейти від ненадійних контактних пар за участю ніхрому до дорогоцінних металів та їх сплавів. Дослідники направили свої зусилля на теоретичне вивчення провідності ССК, підтверджуючи свої висновки результатами експериментів.

Наші теоретичні дослідження зводяться до представлення математичної моделі контактної опору, за якою складено аналітичний вираз, що визначає залежність контактної опору від зусилля. Розрахункові дані наведених параметрів при різних зусиллях контакту зведені в таблицю.

Крім того, експериментально встановлена залежність опору окисної плівки від зусилля. Ця залежність наочно вказує зону оптимального зусилля для аналізованої пари, зону, де є роздільне середовище контактної пари, а дослідження показали, що ця плівка пробивається тунельним ефектом, зберігаючи надійний контакт.

Ключові слова: контактний опір, контактне зусилля, надійність, тертя, зношення, потенціометр.

ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

УДК 621.315.2

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.2.1/04>

Бурик М.П.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Лободзинський В.Ю.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Бурик І.П.

Конотопський інститут Сумського державного університету

Гричановська Т.М.

Конотопський інститут Сумського державного університету

Бібік В.В.

Конотопський інститут Сумського державного університету

МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ ДВОЖИЛЬНОГО КАБЕЛЮ ЗА ДОПОМОГОЮ СИСТЕМИ ЧОТИРЬОХ ЗАРЯДЖЕНИХ ОСЕЙ

Представлено дослідження плоскопаралельного поля однорідної за довжиною кабельної лінії передачі методом комп'ютерного моделювання в математичному середовищі Mathcad для фіксованого моменту часу. Наведено результати дослідження розподілу ліній однакового потенціалу та силових ліній електричного поля двожильного кабелю для різних діаметрів жил. Розроблено математичну модель картини електричного поля кабелю в комплексних координатах на основі системи чотирьох заряджених осей. Для розрахунку електричного поля кабелю у циліндричній системі координат використано теорему Гаусса, що є одним з основних законів електричного поля.

Математична модель дозволяє змінювати діаметри жил кабелю, відстань між жилами, радіус оболонки кабелю, використовувати різні ізоляційні матеріали за рахунок задання відповідного значення відносної діелектричної проникності.

Збільшення діаметру жили кабелю у 2.5 рази привело до зменшення напруженості для вказаної координати $x=75$ в 425 разів при відносній діелектричній проникності ізоляції в середні кабелю $\epsilon_r=1$. Цим досягнуто максимальну електричну міцність кабелю.

Отримані результати досліджень дозволяють визначати області з високими значеннями напруженості електричного поля в середині кабелю, які порівнюють з допустимими значеннями.

Картина електричного поля двожильного кабелю показує, що в діелектрику електричне поле має потенціальний характер, тобто є безвихровим, як і електростатичне поле для двох протилежних за знаком точкових зарядів. Лінії рівного потенціалу є окружностями, а поверхні рівного потенціалу являються коловими циліндрами. Одна з поверхонь перетворюється на площину з нульовим значенням потенціалу. Лінії напруженості являють собою дуги окружностей, які починаються з жили кабелю, що має позитивний заряд та закінчуються на жилі, що має негативний заряд.

Ключові слова: двожильний кабель, картина електричного поля, скалярний потенціал, напруженість електричного поля, комплексний потенціал.

Постановка проблеми. Для передачі та розподілу електричної енергії від джерела до споживача використовують кабель, який представляє собою одну або більше ізольованих жил, що зна-

ходяться як правило в металевій або неметалевій оболонці, зверху якої в залежності від умови прокладки та експлуатації може бути відповідне захисне покриття, в яку може входити броня [1].

Кабелі використовують як у силових колах так і для мережі зв'язку для передачі інформації на відстань [2].

Струмопровідні мідні чи алюмінієві жили застосовують для проходження електричного струму. Форма жил може бути круглою або фасонною. Виготовляють струмопровідні жили однодротовими чи багатодрововими. Ізоляція кабелю забезпечує необхідну електричну міцність струмопровідних жил відносно одна одної та до заземленої оболонки. В якості матеріалів для ізоляції використовують різні діелектрики, а саме: просочені маслоканіфольним складом папери марок МП-3 та МП-5, поліетилен, полівінілхлорид, етиленпропілен та інші.

Ізоляції кабелів повинна мати високу електричну міцність. Підвищення електричної міцності ізоляційного матеріалу кабелів, приводить до зменшення товщини ізоляції, що відповідно покращує відвід тепла від струмопровідних жил, та дозволяє збільшувати електричний струм, зменшує витрату діелектричних матеріалів на виготовлення кабелю, а також підвищує його механічні властивості (гнучкість) [2].

Зважаючи на це, актуальним є дослідження розподілу напруженості електричного поля ізоляції для визначення ділянок у кабелі з максимальними значеннями методом комп'ютерного моделювання. Картина електричного поля кабелю дозволить знаходити місця пробою ізоляції або погіршення ізоляційних властивостей ще на етапі проектування електротехнічного пристрою.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Основні властивості та методи аналізу електромагнітного поля припускають якісне та кількісне дослідження електромагнітних полів, які зустрічаються у електротехнічних пристроях (кабелях). Для цього найбільш придатні рівняння електродинаміки в інтегральній та диференціальній формах.

Дослідження складних електромагнітних процесів у електротехнічних установках проводяться за допомогою аналітичних, графічних та чисельних методів на основі відомих сучасних програмних комплексів (Mathcad, Matlab, COMSOL Multiphysics, Ansys та інших).

Пакет Mathcad є середовищем візуального програмування та використовує звичайні математичні позначення. Математичний пакет Matlab є своєрідною мовою програмування високого рівня. Ці математичні пакети використовуються для моделювання складних систем [4-9]. Наприклад, ідентифікація несправностей системи заземлення екранів високовольтних кабелів на основі аналізу

струмів короткого замикання реалізована шляхом математичного моделювання каскадної схеми із застосуванням програмного продукту Matlab в пакеті прикладних програм Simulink за допомогою бібліотечного блоку SimPowerSystems [10].

При аналізі плоскопаралельного електричного поля кабелю також використовують програмні пакети мультифізичного моделювання Comsol Multiphysics та Ansys для підвищення ступеня візуалізації результатів. Програмне забезпечення Comsol Multiphysics застосовують для дослідження методом скінчених елементів, імітації різних фізичних та інженерних додатків [11]. Ansys є професійним кінцево-елементним розрахунковим комплексом, який вирішує завдання електромагнетизму, теплообміну та інше [12].

Але останні три програмні пакети мають недолік, а саме високу вартість.

Постановка завдання. Розробити математичну модель для побудови картини електричного поля в комплексних координатах в середовищі Mathcad. Дослідити електричне поле двожильного кабелю для фіксованого моменту часу та отримати практичні навички використання сучасних методів розрахунку та моделювання електромагнітних полів. Також проаналізувати вплив зміни діаметру перерізу жили кабелю на картину плоскопаралельного поля.

Виклад основного матеріалу дослідження. Під час дослідження кабелів в першу чергу визначають максимальну напруженість електричного поля ізоляції та порівнюють з допустимим значенням. Геометрія кабелів рахується заданою.

Теоретичний розрахунок кабелю допускає деякі спрощення, які не порушують принципи дії пристрою, при зображенні (рис. 1):

- 1) для кабелю зображуються тільки жили та концентрична оболонка;
- 2) простір між ними заповнено ізоляцією з діелектричною проникністю ϵ_1 ;
- 3) пристрій для підключення до джерела напруги не показано;
- 4) не наведено деталі, що фіксують жили.

Для розрахунку поля кабелю у циліндричній системі координат застосовують теорему Гаусса, яка є одним з основних законів електричного поля

$$\oint_S \bar{D} d\bar{s} = \oint_S \epsilon_0 \bar{E} d\bar{s} = \epsilon_0 \oint_S \bar{E} d\bar{s} = q, \quad (1)$$

$$\oint_S \bar{E} d\bar{s} = \frac{q}{\epsilon_0},$$

де \bar{D} – вектор електричного зміщення (електричної індукції), $\frac{К}{м^2}$;

S – деяка замкнута поверхня, m^2 ;
 $\epsilon_0 = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot 9 \cdot 10^9}$ – електрична стала, $\frac{\Phi}{M}$;
 \vec{E} – вектор напруженості електричного поля, $\frac{B}{M}$;
 q – електричний заряд, K .

Електричне поле кабелю буде плоскопаралельне і напруженість E поля буде залежати тільки від радіуса циліндра R . У будь-якій точці, яка буде лежати на поверхні циліндра радіуса R , вектор \vec{D} має єдину радіальну складову D_R , яка стала у всіх точках цієї поверхні. Потік вектора \vec{D} через поверхню цього циліндра з зарядом τl в середині нього знаходиться як:

$$\oint_S \vec{D} d\vec{s} = \oint_S D_R ds = D_R \oint_S ds = D_R 2\pi R l = \epsilon_r \epsilon_0 E_R 2\pi R l = \tau l, \quad (2)$$

$$E = E_R = \frac{\tau l}{2\pi R l \epsilon_r \epsilon_0} = \frac{\tau}{2\pi R \epsilon_r \epsilon_0},$$

де l – довжина циліндра, m ;
 R – радіус основи циліндра, m ;
 ϵ_r – відносна діелектрична проникність, $\frac{\Phi}{\frac{K}{M}}$;
 τ – заряд на одиницю довжини кабелю, $\frac{K}{M}$.

Потік вектора \vec{D} через торцеві частини (основи) циліндра дорівнює нулю.

Скалярний потенціал зарядженої осі ϕ дорівнює

$$E = -\frac{d\phi}{dR},$$

$$\phi = -\int E_R dR = -\int \frac{\tau}{2\pi R \epsilon_r \epsilon_0} dR = -\frac{\tau}{2\pi R \epsilon_r \epsilon_0} \ln R + C. \quad (3)$$

Геометричні розміри: $R = 10$ (мм); $l = 10$ (мм);
 діаметр жили $d = 1.5$ (мм); $\epsilon_r = 1$. Між жилами кабелю прикладено напругу $U = 100$ (В).

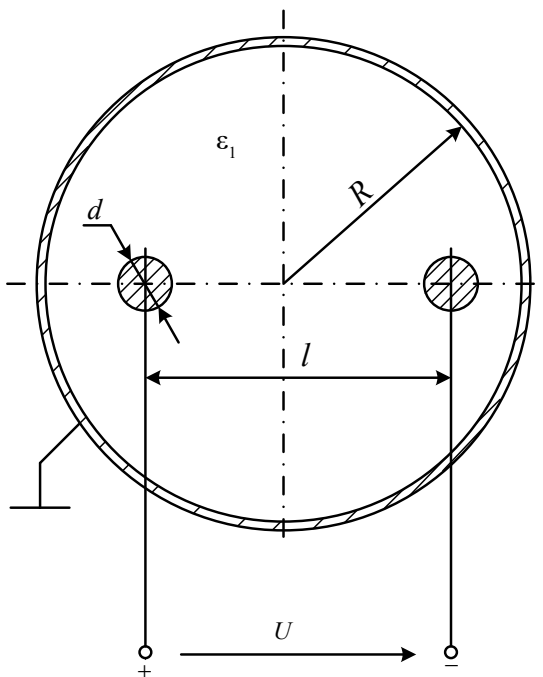


Рис. 1. Поперечний переріз двожильного кабелю та його геометрія

Замінімо кабель системою чотирьох заряджених осей, так щоб оболонка кабелю залишилася екіпотенціальною поверхнею (рис. 2). Для цього повинні виконуватися співвідношення [13]:

$$s - a = \frac{l}{2} \text{ та } s^2 = a^2 + R^2,$$

тоді $a = \frac{R^2}{l} - \frac{l}{4} = \frac{10^2}{10} - \frac{10}{4} = 7.5$ (мм);

$$s = \frac{R^2}{l} + \frac{l}{4} = \frac{10^2}{10} + \frac{10}{4} = 12.5$$
 (мм);

$$s + a = \frac{2 \cdot R^2}{l} = \frac{2 \cdot 10^2}{10} = 20$$
 (мм).

Потенціал будь-якої точки A з координатами x, y , що задовольняє умові $x^2 + y^2 \leq R^2$ за методом накладання для двох двопровідних ліній (1 – 2 та 1' – 2').

Прийmemo $\phi = 0$ при $x = 0$

$$\phi(x, y) = \frac{\tau}{2\pi \epsilon_r \epsilon_0} \left(\ln \left(\frac{r_2(x, y)}{r_1(x, y)} \right) + \ln \left(\frac{r_1'(x, y)}{r_2'(x, y)} \right) \right) \quad (4)$$

де x та y вимірюються в мм.

$$r_1(x, y) = \sqrt{\left(\frac{l}{2} + x\right)^2 + y^2};$$

$$r_2(x, y) = \sqrt{\left(\frac{l}{2} - x\right)^2 + y^2};$$

$$r_1'(x, y) = \sqrt{\left(2a + \frac{l}{2} + x\right)^2 + y^2};$$

$$r_2'(x, y) = \sqrt{\left(2a + \frac{l}{2} - x\right)^2 + y^2}.$$

Координати точок на поверхні жил кабелю x_1, x_2 та y_1, y_2

$$x_1 = -\left(\frac{l}{2} + \frac{d}{2}\right) = -\left(\frac{10}{2} + \frac{1.5}{2}\right) = -5.75; \quad y_1 = 0;$$

$$x_2 = \left(\frac{l}{2} + \frac{d}{2}\right) = \left(\frac{10}{2} + \frac{1.5}{2}\right) = 5.75; \quad y_2 = 0.$$

Потенціал на поверхні проводів ϕ_1 та ϕ_2 в указаних точках:

$$\phi_1(x_1, y_1) = \frac{\tau}{2\pi \epsilon_r \epsilon_0} \left(\ln \left(\frac{2l}{d} \right) + \ln \left(\frac{2a}{2a+l} \right) \right); \quad (5)$$

$$\phi_2(x_2, y_2) = \frac{\tau}{2\pi \epsilon_r \epsilon_0} \left(\ln \left(\frac{2l}{d} \right) + \ln \left(\frac{2a+l}{2a} \right) \right).$$

Напруга між жилами кабелю (за умовою завдання $U = 100$ (В))

$$U = \phi_1 - \phi_2 = \frac{\tau}{2\pi \epsilon_r \epsilon_0} \left(\ln \left(\frac{2l}{d} \right) + \ln \left(\frac{2a}{2a+l} \right) \right) = \frac{\tau}{2\pi \epsilon_r \epsilon_0} \left(\ln \left(\frac{2l}{d} \right) + \ln \left(\frac{2a}{2a+l} \right) \right) = 100 \text{ (В)}. \quad (6)$$

Лінійний поверхневий заряд на жилах кабелю

$$\tau = \frac{U \pi \epsilon_r \epsilon_0}{\left(\ln \left(\frac{2l}{d} \right) + \ln \left(\frac{2a}{2a+l} \right) \right)} = \frac{100 \cdot \pi \cdot 1 \cdot \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot 9 \cdot 10^9}}{\left(\ln \left(\frac{2 \cdot 10}{1.5} \right) + \ln \left(\frac{2 \cdot 7.5}{2 \cdot 7.5 + 10} \right) \right)} = 1.337 \cdot 10^{-9} \left(\frac{Kл}{M} \right) \quad (7)$$

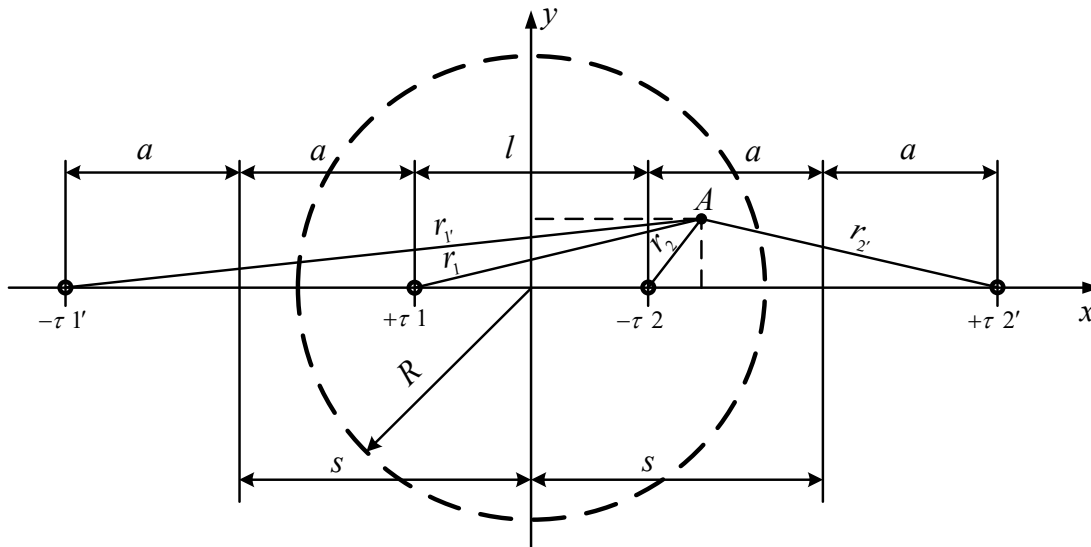


Рис. 2. Система чотирьох заряджених осей

Погона ємність на одиницю довжини кабелю дорівнює

$$C_0 = \frac{\tau}{U} = \frac{1.337 \cdot 10^{-9}}{100} = 1.337 \cdot 10^{-11} \left(\frac{\Phi}{\text{М}} \right). \quad (8)$$

Для створення картини електричного поля двожильного кабелю в комплексних координатах необхідно використати комплексний потенціал [13]. Лінії однакового потенціалу задаються функцією $U(x, y)$, а лінії струму функцією $V(x, y)$. Для зручності координати (x, y) на площині задаються комплексною координатою $z(x, y) = x + (-1)^{0.5} \cdot y$.

Обидві функції $U(x, y)$ та $V(x, y)$ є частинами комплексного потенціалу

$$W(x, y) = U(x, y) + (-1)^{0.5} \cdot V(x, y). \quad (9)$$

Реальна $U(x, y)$ і уявна $V(x, y)$ складові комплексного потенціалу зв'язані умовою Коші-Рімана [14]:

$$\frac{\partial U(x, y)}{\partial x} = \frac{\partial V(x, y)}{\partial y}; \quad \frac{\partial U(x, y)}{\partial y} = -\frac{\partial V(x, y)}{\partial x}. \quad (10)$$

Зв'язок між функцією потенціалу $U(x, y)$ та функцією потоку $V(x, y)$ дозволяє при наявності однієї функції, наприклад, потенціалу $U(x, y)$ визначити іншу – функцію потоку $V(x, y)$. Для цього використовують умову Коші-Рімана. З першого рівняння (9) отримаємо

$$\begin{aligned} \frac{\partial U(x, y)}{\partial x} &= \frac{\partial V(x, y)}{\partial y}; \\ V(x, y) &= \int \frac{\partial U(x, y)}{\partial x} dy + f(x). \end{aligned} \quad (11)$$

Для визначення невідомої функції $f(x)$ використаємо друге рівняння Коші-Рімана

$$\begin{aligned} \frac{\partial U(x, y)}{\partial y} &= -\frac{\partial V(x, y)}{\partial x} = -\left(\int \frac{\partial^2 U(x, y)}{\partial x^2} dy + \frac{df(x)}{dx} \right); \\ f(x) &= -\int \frac{\partial U(x, y)}{\partial y} dx + \int dx \int \frac{\partial^2 U(x, y)}{\partial x^2} dy + C. \end{aligned} \quad (12)$$

Для відображення картини електричного поля кабелю, побудуємо сітку (масив) з $N \times N$ комірок ($N=250$), до якого занесемо комплексні потенціали точок площини 25×25 мм. На 1 мм площини приходиться 10 точок, для яких визначаються напруженість $E(x, y) = U(x, y)$ та потенціал $\varphi(x, y) = U(x, y)$

$$W(x, y) = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0} \left(\ln \left(\frac{z(0.5 \cdot l - x, -y)}{z(0.5 \cdot l + x, y)} \right) + \ln \left(\frac{z(-0.5 \cdot l - 2 \cdot a - x, -y)}{z(-0.5 \cdot l - 2 \cdot a + x, y)} \right) \right) \quad (13)$$

$W(x, y)$ -комплексний потенціал;
 $U(x, y)$ -потенціальна функція;
 $V(x, y)$ -силова функція.

Розподіл потенціалу у просторі та всередині оболонки кабелю відповідає умовам:

$$\begin{aligned} x_i^2 + y_j^2 &\leq R^2; \\ (0.5 \cdot l + x_i)^2 + y_j^2 &< (0.5 \cdot d)^2; \\ (-0.5 \cdot l + x_i)^2 + y_j^2 &< (0.5 \cdot d)^2, \end{aligned} \quad (14)$$

де $i=0, 1, 2, \dots, N$ – точки по горизонтальній осі;
 $j=0, 1, 2, \dots, N$ – точки по вертикальній осі.

Об'єднаємо область визначення функції з дискретною сіткою (масивом):

$$x_i = -s + \frac{2 \cdot s}{N} \cdot i; \quad y_j = -s + \frac{2 \cdot s}{N} \cdot j, \quad (15)$$

де x_i – дискретизація за віссю x ; y_j – дискретизація за віссю y ; $\frac{2 \cdot s}{N}$ – крок дискретизації.

Підставляємо масив дискретних значень функцій до вузлів сітки $W_{i,j} = f(x_i, y_j)$ та отримаємо картину електричного поля двожильного кабелю, яка наведена на рис. 3. Червоним кольором показані силові лінії, а синім кольором наведені лінії однакового потенціалу.

На (рис. 4, а) представлені оцифровані силові лінії, як силові функції $V(x, y) = \text{Im}(W(x, y))$, а оцифровані лінії однакового електричного

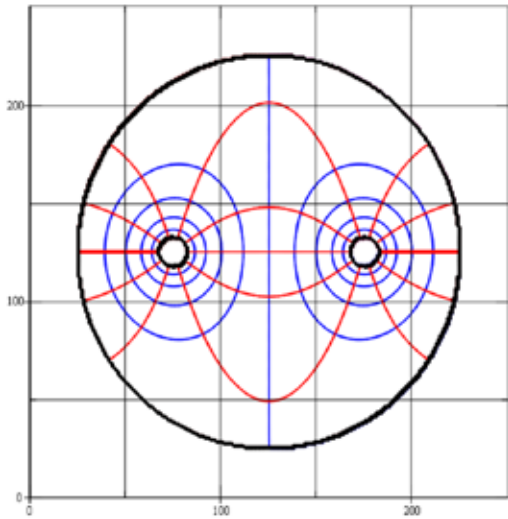


Рис. 3. Картина електричного поля двожильного кабелю

потенціалу показані на (рис.4, б), як потенціальні функції $U(x, y) = \text{Re}(W(x, y))$.

Графіки розподілу електричного потенціалу $\varphi = U(\text{В})$ уздовж осі x при вказаній координаті y у наведені на рис. 5. Графіки розподілу електричного потенціалу $U(\text{В})$ уздовж осі y при вказаній координаті x представлені на рис. 6.

Графіки розподілу напруженості $E(\text{В/мм})$ уздовж осі x при вказаній координаті y у показані на рис. 7 та (рис. 9, а).

Графіки розподілу напруженості $E(\text{В/мм})$ уздовж осі y при вказаній координаті x , представлені на рис. 8 та (рис. 9, б).

Проведемо дослідження впливу розміру поперечного перерізу жили на картину електричного поля кабелю (рис. 10) для досягнення максимальної електричної міцності кабелю. Збільшив в 2.45 рази

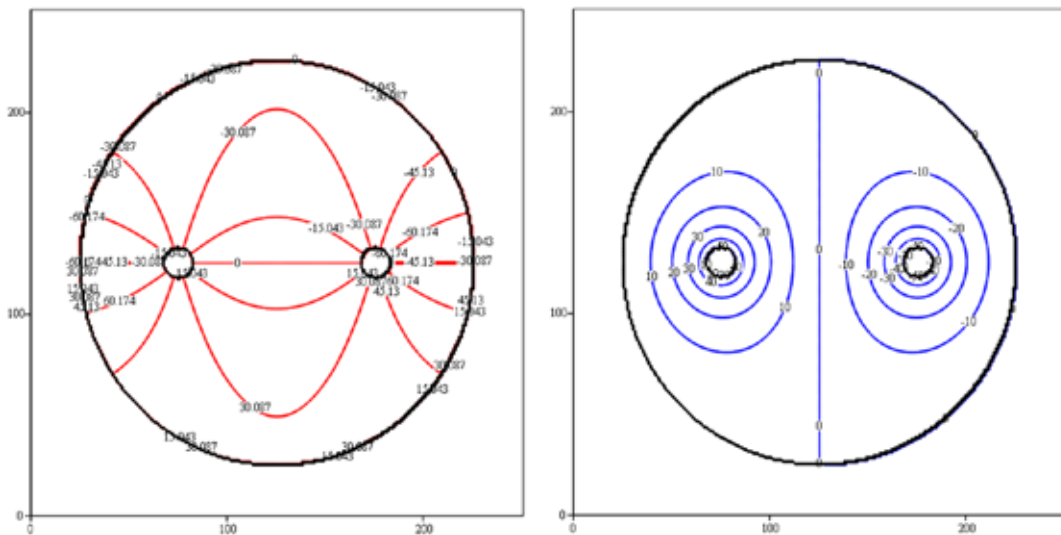


Рис. 4. Графіки оцифрованих силових ліній (а) та ліній однакового електричного потенціалу (б) двожильного кабелю

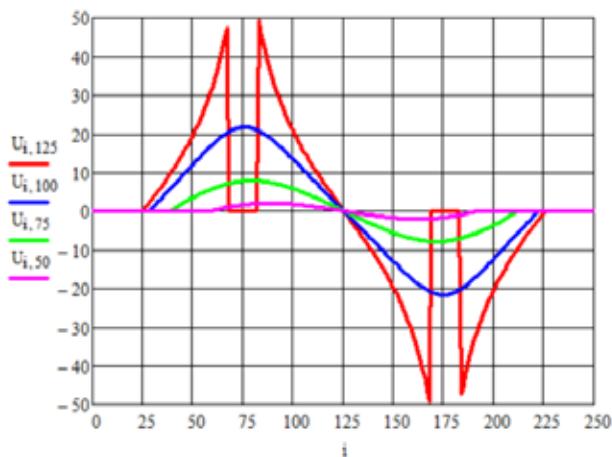


Рис. 5. Графіки розподілу електричного потенціалу $U(\text{В})$ уздовж осі x при вказаній координаті y

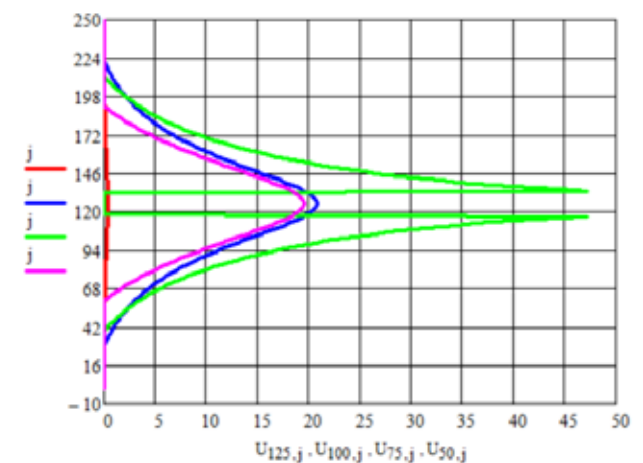


Рис. 6. Графіки розподілу електричного потенціалу $U(\text{В})$ уздовж осі y при вказаній координаті x

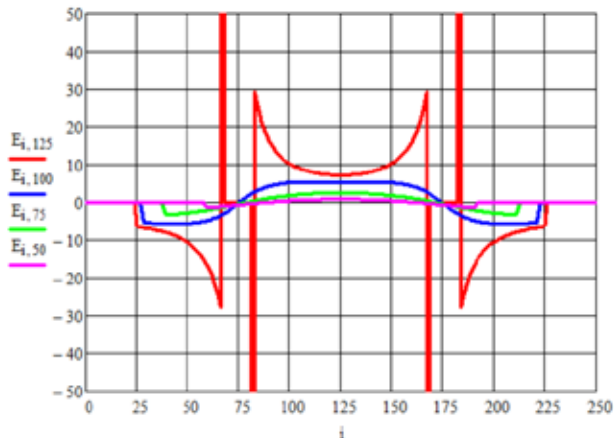


Рис. 7. Графіки розподілу напруженості E (В/мм) уздовж осі x при вказаній координаті y

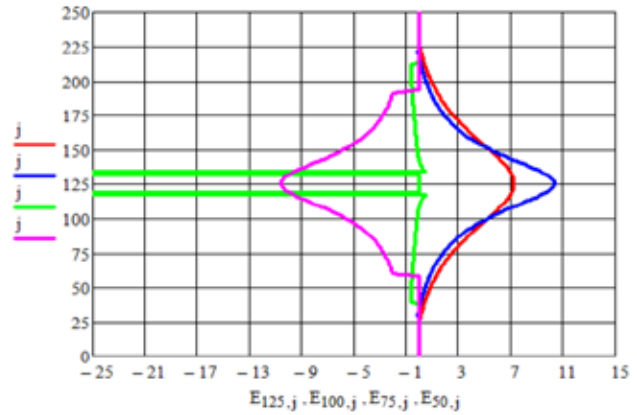


Рис. 8. Графіки розподілу напруженості E (В/мм) уздовж осі y при вказаній координаті x

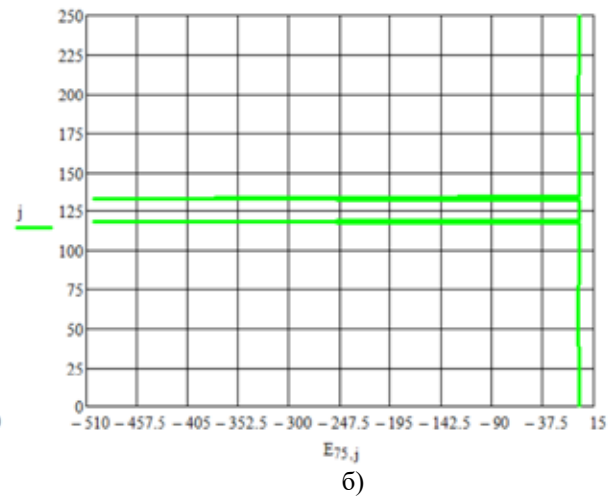
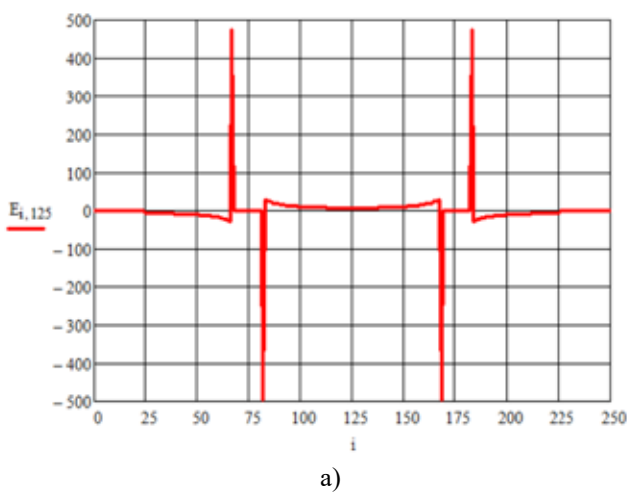


Рис. 9. Графіки розподілу напруженості E (В/мм) уздовж осі x при вказаній координаті $y=125$ (а) та уздовж осі y при вказаній координаті $x=75$ (б) для діаметра жили кабелю $d = 1.5$ (мм)

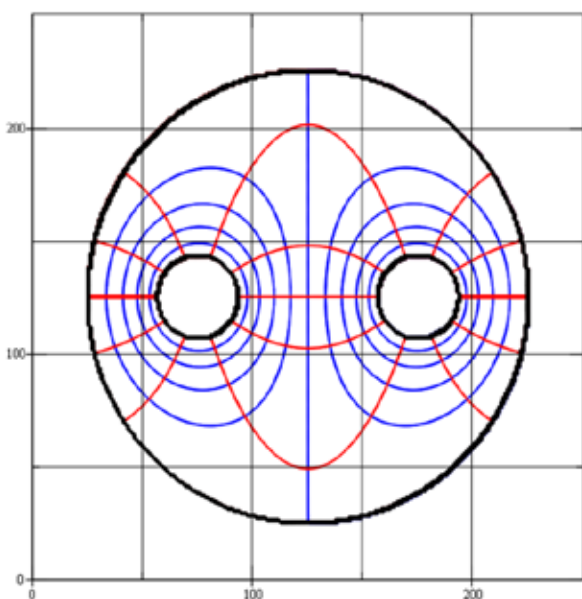


Рис. 10. Картина електричного поля двожильного кабелю при збільшеному діаметрі жили кабелю в 2.453 разів

переріз жили порівняно з заданим значенням ($d = 1.5$ (мм)) та виведемо розподіл напруженості для вказаних координат (рис. 11).

Максимальне значення напруженості електричного поля для вказаної координати $y=125$ не змінилась під час розподілу уздовж осі x і $E = 480$ (В/мм) при збільшенні діаметру жили кабелю, а для вказаної координати $x=75$ при розподілу уздовж осі y значення напруженості зменшилось з 510 (В/мм) до 1.2 (В/мм).

Висновок. Розроблена математична модель електричного поля двожильного кабелю дозволяє аналізувати розподіл вектора напруженості \vec{E} та скалярного потенціалу електричного поля ϕ вздовж осей x та y . Також математична модель дозволяє змінювати діаметр жил кабелю d , відстань між жилами l , радіус оболонки кабелю R , використовувати різні ізоляційні матеріали за рахунок задання відповідного значення відносної діелектричної проникності ϵ_r .

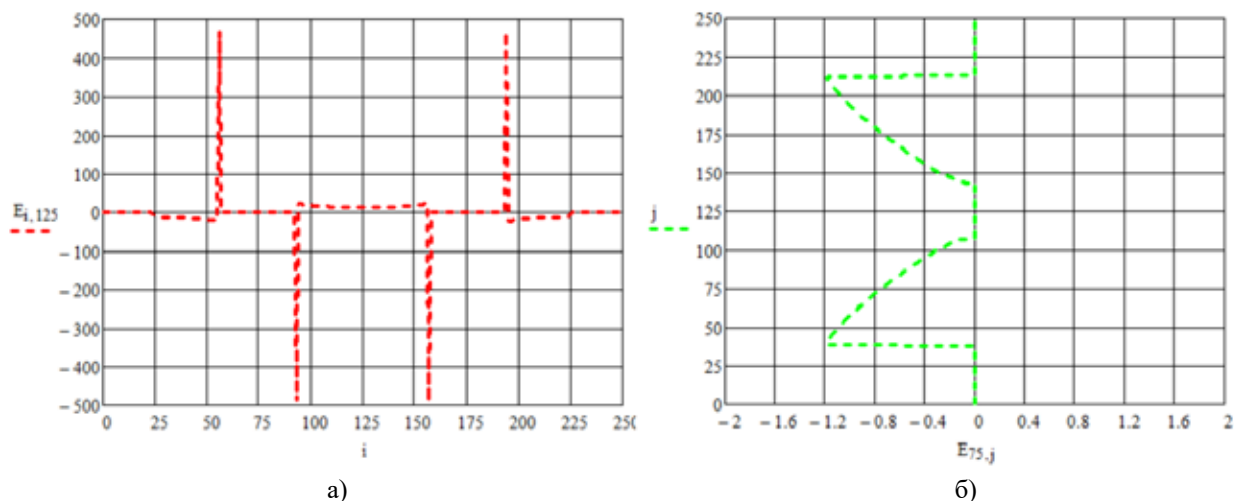


Рис. 11. Графіки розподілу напруженості E (В/мм) уздовж осі x при вказаній координаті $y=125$ (а) та уздовж осі y при вказаній координаті $x=75$ (б) для діаметра жили кабелю $d = 3.7$ (мм)

Збільшення діаметру жили кабелю у 2.5 рази привело до зменшення напруженості для вказаної координати $x=75$ в 425 разів при відносній діелектричній проникності ізоляції в середній кабелю $\epsilon_r = 1$. Це обумовлено тим, що при виконанні співвідношення $\ln \frac{R}{0.5 \cdot d} = 1$ або $\frac{R}{0.5 \cdot d} = e \approx 2.7$ напруженість \bar{E}_{\max} становиться мінімальною та досягається максимальна електрична міцність кабелю.

Отримані результати досліджень дозволяють визначати області з високими значеннями напру-

женості електричного поля в середині кабелю, які порівнюють з допустимими значеннями. А це дозволяє знаходити місця пробою ізоляції або ділянки з погіршеною ізоляційною властивістю.

Електричне поле в середній металевих жил кабелю відсутнє, але на поверхні воно значно зростає. Картина електричного поля двожильного кабелю показує, що в діелектрику, у якому розташовані жили кабелю зі струмом (поперечний переріз жили має форму кола), електричне поле має потенціальний характер, як і електростатичне поле.

Список літератури:

1. Бачелис Д.С., Саакян А.Е. Электрические кабели, провода и шнуры: справочник / под общ. ред. Н. И. Белоруссов. М, 1971. Изд. 3. 704 с.
2. Вакулєнко О.В., Голь В.Д., Ірха М.С., Хахлюк О.А. Лінії передачі: підручник. Київ: ІСЗЗІ КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 218 с.
3. Дьяков Є.Д. Силові кабелі. Тексти лекцій з курсу “Кабельні й повітряні лінії електропередачі”. Харків: ХНАМГ, 2007. 64 с.
4. Міліх В. І. Електромагнітні поля, параметри та процеси в електротехнічних пристроях: підручник. Харків, 2020. 396 с.
5. Бойко В.С., Бойко В.В., Видолоб Ю.Ф., Курило І.А., Шеховцов В.І. та Шидловська Н.А. Теоретичні основи електротехніки: підручник / за заг. ред. І.М. Чижєнка, В.С. Бойка. Київ, 2013. Т. 3. 244 с.
6. Задачин В. М., Конюшенко І.Г. Чисельні методи: навчальний посібник. Харків: ХНЕУ ім. С. Кузнеця, 2014. 180 с.
7. Пакети прикладних програм для моделювання електромагнітних полів електричних машин “Використання комп’ютерних систем математичних розрахунків MATLAB та FEMM для аналізу електричних машин” Київ, 2022. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/49103> (дата звернення: 17.03.2023)
8. Бельцевич Г.Н. Сборник специализированных задач по курсу Теоретические основы электротехники для специальностей «Электроизоляционная и кабельная техника и полупроводники и диэлектрики». М: МЭИ, 1985. 50 с.
9. Андреев Г.П., Баранов И.И. Сборник задач и упражнений по теоретическим основам электротехники: Учеб. пособие для вузов / под ред. П.А. Ионкина. М.: Энергоиздат, 1982. 768 с.
10. Лободзинський В.Ю., Бурик М.П., Спінул Л.Ю., Чибеліс В.І., Ілліна О.О. Ідентифікація несправностей системи заземлення екранів високовольтних кабелів на основі аналізу струмів короткого замикання. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. Том 33 (72), №2, 2022. с. 19-23. DOI: <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.2/04>

11. Bhatti A., Peng X., Yang B. and Xie C., Effect of Void on Temperature Distribution in XLPE Power Cables by COMSOL Multiphysics Simulation, *2021 IEEE 4th International Electrical and Energy Conference (CIEEC)*, 2021, pp. 1-4. DOI: 10.1109/CIEEC50170.2021.9510219.
12. Fetisov S., Zubko V., Zanegin S., Nosov A. and Vysotsky V. Numerical Simulation and Cold Test of a Compact 2G HTS Power Cable, *in IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2018. Vol. 28, no. 4, pp. 1-5. DOI: 10.1109/TASC.2018.2821708.
13. Ионкин П.А., Даревский А.И., Кухаркин Е.С. Теоретические основы электротехники «Нелинейные цепи и основы теории электромагнитного поля»: Учебник для электротехн. вузов. Изд. 2-е, перераб. и доп. / под ред. П.А. Ионкина. М.: Высшая школа, 1976. Т.2. 383 с.
14. Методи електродинаміки в електротехніці та електромеханіці. Київ, 2021. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/45612> (дата звернення: 17.03.2023).

Buryk M.P., Lobodzynskyi V.Yu., Buryk I.P., Grychanovs'ka T.M., Bibyk V.V. SIMULATION OF THE ELECTRIC FIELD OF A TWO-WIRE CABLE USING A SYSTEM OF FOUR CHARGED AXES

The study of the plane-parallel field of a uniform length transmission cable line by computer modeling in the Mathcad mathematical environment for a fixed moment of time is presented. The results of the study of the distribution of lines of the same potential and lines of force of the electric field of a two-wire cable for different diameters of the wires are presented. A mathematical model of the picture of the electric field of the cable in complex coordinates based on the system of four charged axes has been developed. To calculate the electric field of the cable in the cylindrical coordinate system, the Gauss theorem is used, which is one of the basic laws of the electric field.

The mathematical model allows you to change the diameters of the cable cores, the distance between the cores and the radius of the cable sheath, to use different insulating materials by setting the appropriate value of the relative dielectric constant.

An increase in the diameter of the cable core by 2.5 times led to a decrease in tension for the specified coordinate $x=75$ by 425 times at the relative dielectric permeability of the insulation in the middle of the cable $\epsilon_r=1$. This achieves the maximum electrical strength of the cable.

The obtained research results allow determining areas with high values of electric field intensity in the middle of the cable, which are compared with permissible values.

The picture of the electric field of a two-wire cable shows that in a dielectric the electric field has a potential character; that is, it is vortex-free, as is the electrostatic field for two point charges of opposite sign. Lines of equal potential are circles, and surfaces of equal potential are circular cylinders. One of the surfaces turns into a plane with zero potential. Lines of tension are arcs of circles that start at the cable core that has a positive charge and end at the core that has a negative charge.

Key words: two-wire cable, electric field pattern, scalar potential, electric field intensity, complex potential.

Голощанов С.С.

Херсонська державна морська академія

Колібанов О.К.

Херсонська державна морська академія

ВЗАЄМОЗВ'ЯЗОК НАВАНТАЖУВАЛЬНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

В сучасних судах широко використовуються асинхронні двигуни різного призначення і працюють в різних режимах. Для насосів і вентиляторів застосовуються електродвигуни, призначені для роботи в тривалому (S1) режимі, для якірно-швартових пристроїв – двигуни, що працюють в короткочасному (S2) режимі, для вантажно-розвантажувальних механізмів – двигуни, що працюють в повторно-короткочасному (S3) режимі. При цьому промисловістю випускаються електродвигуни цільового призначення, призначені для роботи тільки в одному із зазначених режимів. Однак на практиці часто виникає питання, які навантаження допускає двигун, спроектований, наприклад, для тривалого режиму, при експлуатації в режимах короткочасному і повторно-короткочасному. Актуальною може бути і зворотна задача: розрахунок допустимої потужності двигуна, спроектованого для короткочасного або повторно-короткочасного режиму при його використанні в тривалому режимі. У цій статті наведено спроба встановлення кількісної взаємозв'язку між зазначеними режимами і методика перерахунку режимів роботи електродвигуна одного в інший. Розрахунок режимів двигуна проводиться на підставі роботи його теплової моделі. При цьому в якості вихідних даних використовуються тільки дані каталогу: потужність, струм, к.к.д, вага, клас ізоляції, кратність максимального моменту. Розрахункова задача розділена на кілька підзадач: визначення потужності двигуна в тривалому режимі, призначеного для роботи в повторно-короткочасному режимі (завдання пряма і зворотня); розрахунок потужності двигуна в тривалому режимі роботи по відомим його параметрам для короткочасного режиму і визначення допустимої потужності для короткочасного режиму по відомим параметрам тривалого режиму з урахуванням максимально можливої перевантажувальної здатності двигуна по моменту.

Ключові слова: *двигун, температура, тепловий баланс, потужність, навантаження, втрати, постійна часу нагріву.*

Постановка задачі. Стандартами встановлюються 10 режимів S1-S10 роботи електродвигунів, залежно від умов експлуатації. Основні їх три: S1 – тривалий, S2 – короткочасний, S3 – повторно-короткочасний. Інші 7 режимів враховують, в основному, часті пуски, гальмування, реверси, перемижований режим роботи [1].

Основним режимом двигунів, що виробляються промисловістю, є режим S1. Для експлуатації в режимах S2 і S3 випускаються електродвигуни, переважно спеціального застосування. Зокрема, для короткочасного режиму S2 випускаються електродвигуни якірно-швартових пристроїв, призначені для роботи в відносно невеликому проміжку часу. Для повторно-короткочасного режиму S3 застосовуються двигуни вантажно-розвантажувальних механізмів: лебідок, кранів тощо. І, якщо при застосуванні для зазначених режимів двигунів постійного струму в них зміцнюється колекторний вузол, то при використанні найбільш

застосовуваних в даний час асинхронних двигунів в останніх помітні відмінні конструктивні особливості не передбачаються.

Аналіз останніх тематичних досягнень. В даний час для аналізу теплових процесів, що відбуваються в двигуні при різних режимах навантаження в літературі розглядається питання розрахунку потужності в одному із зазначених режимів [2 С. 155, 161, 163, 3 С. 370, 377, 380] або питання перевірки двигунів по нагріву в цих режимах [4. С. 386, 395, 397].

Однак при проектуванні та (або) експлуатації двигунів часто виникає питання, як поведеться двигун, призначений для режиму роботи S1 при його використанні в режимах S2 та S3? І хоча ці питання частково вже вирішені, зокрема, застосування режиму S2 і S3 у двигуні, спроектованого для роботи в режимі S1 [5], актуальною часто є зворотне завдання, до якої потужності можна навантажувати двигун у тривалому режимі, який

спроєктований для роботи у короткочасному та повторно-короткочасних режимах $S2$ та $S3$?

Мета досліджень. Метою досліджень було вирішення питань кількісного взаємозв'язку режимів роботи двигуна з урахуванням його теплової моделі. При цьому як джерело інформації про параметри двигуна є лише його каталожні дані.

Основна частина. Найбільш просто завдання вирішується для взаємозв'язку режимів $S1$ та $S3$. При цьому повторно короткочасний режим $S3$ характеризується відносною тривалістю включення або тривалістю включення $ПВ$,

$$\varepsilon = \frac{t_p}{t_p + t_n}, \quad ПВ = \varepsilon \cdot 100\%,$$

де t_p – час роботи,

t_n – час паузи.

Скористаємося відомим співвідношенням [3, с. 385]

$$P = P_{0,25} \sqrt{(a_{0,25} + 1) \cdot \frac{0,25}{\varepsilon - a_{0,25}}}$$

де P – потужність двигуна в режимі, що відповідає дійсному режиму навантаження двигуна, який характеризується розрахунковим значенням $ПВ$ (або ε) двигуна за циклограмою навантаження,

$P_{0,25}$ – значення потужності двигуна при $\varepsilon = 0,25$,

$a_{0,25}$ – коефіцієнт змінних втрат при навантаженні $P_{0,25}$, $a_{0,25} = \frac{\Delta P_{\kappa}}{\Delta P_{v0,25}}$,

ΔP_{κ} – загальні втрати двигуна;

$\Delta P_{v0,25}$ – змінні втрати двигуна при $P_{0,25}$.

Поширюючи наведений вираз на режим $\varepsilon = 0,4$, отримаємо

$$P = P_{0,4} \sqrt{(a_{0,4} + 1) \cdot \frac{0,4}{\varepsilon - a_{0,4}}},$$

де $P_{0,4}$ – значення потужності двигуна при $\varepsilon = 0,4$,

$a_{0,4}$ – коефіцієнт змінних втрат при навантаженні $P_{0,4}$, $a_{0,4} = \frac{\Delta P_{\kappa}}{\Delta P_{v0,4}}$,

$\Delta P_{v0,4}$ – змінні втрати двигуна при $P_{0,4}$.

Без урахування постійних втрат формула набуде вигляду

$$P = P_{\varepsilon} \sqrt{\frac{\varepsilon_{ном}}{\varepsilon}},$$

де $\varepsilon_{ном} = 0,4$ – нормативне значення ε по каталогу $P_t = P_{0,4}$ – значення потужності двигуна, що відповідає $\varepsilon_{ном}$.

Приблизне значення потужності двигуна в тривалому режимі роботи за даними каталогу для двигуна, призначеного для роботи в повторно-короткочасному режимі без урахування постійних втрат, можна визначити, прийнявши $\varepsilon = 100\%$:

$$P = P_{\varepsilon} \sqrt{\varepsilon_{ном}},$$

що при $\varepsilon_{ном} = 0,4$ дає $P \approx 0,6 P_{\varepsilon}$.

Слід зазначити, що наведена залежність носить досить наближений характер, проте вона все ж таки дозволяє орієнтовно визначити потужність двигуна при тривалому навантаженні за відомою P_{ε} і $\varepsilon_{ном}$. Аналогічно можна вирішити обернену задачу: для двигуна, призначеного для роботи у тривалому режимі, визначити, яку потужність він зможе віддавати при його використанні із заданим значенням ε .

Дещо складніше ситуація зі зв'язком режимів $S1$ та $S2$.

Для з'ясування зв'язку режимів $S1$ та $S2$ необхідно на додаток до даних каталогу знати загальну масу двигуна $M_{дв}$ та його клас ізоляції.

Припустимо, що потрібно розрахувати потужність двигуна в довготривалому режимі роботи $S1$ за відомими параметрами для короткочасного режиму роботи $S2$.

По масі двигуна можна визначити його загальну теплоємність C як

$$C = c \cdot M_{дв},$$

де $c = 490$ Дж/кг – питома теплоємність сталі за нормальної температури 400°K .

При цьому вважаємо, що маса двигуна визначається в основному масою активної та конструкційної сталі.

За класом ізоляції можна приблизно визначити середню максимально можливу температуру двигуна. Так, у двигунах морського виконання використовується, в основному, клас ізоляції H з максимальною температурою $\tau_{із} = 180^{\circ}$. Враховуючи, що окремі елементи конструкції двигуна, зокрема обмотки, можуть нагріватися дещо більше, визначаємо середню температуру $\tau_{сеп}$ двигуна як

$$\tau_{сеп} = \tau_{із} - 30^{\circ}$$

де 30° – запас на перегрів окремих частин двигуна.

Заданою максимальною температурою доквілля 40°C . Тоді граничне значення перегріву $\tau_{зр}$ двигуна дорівнюватиме

$$\tau_{зр} = \tau_{сеп} - 40^{\circ},$$

що для класу ізоляції H складе

$$\tau_{зр} = 180 - 30 - 40 = 110^{\circ}\text{C}.$$

По к.к.д. двигуна та його потужності визначаються його втрати як

$$\Sigma P = P_2 \left(\frac{1}{\eta} - 1 \right),$$

де P_2 – потужність на валу двигуна.

При розрахованих втратах номінального режиму та вказаному перегріві тепловіддача складає

$$A = \frac{\Sigma P}{\tau_y} \text{ Вт}/^{\circ}\text{C}, \quad (1)$$

де τ_y – значення температури двигуна, що встановилося в режимі *S1*

Постійна часу нагріву визначиться як

$$T = \frac{C}{A} \text{ с.} \quad (2)$$

Сумарні втрати ΣP поділяємо на постійні $P_{\text{пост}}$ (не залежні від навантаження) і змінні $P_{\text{зм}}$ (залежні від навантаження). До постійних втрат, перш за все, слід віднести втрати у сталі, до змінних – втрати в обмотках двигуна.

Тоді коефіцієнт змінних втрат a_1 при номінальному навантаженні визначиться як

$$a_1 = \frac{\Sigma P}{P_{\text{зм}}}.$$

Постійні втрати $P_{\text{пост}}$ будуть дорівнювати

$$P_{\text{пост}} = \Sigma P - \frac{\Sigma P}{a_1} = \Sigma P \left(1 - \frac{1}{a_1} \right)$$

Якщо при короткочасному режимі роботи основна складова втрат двигуна визначається втратами в обмотках, постійними втратами у першому наближенні можна знехтувати.

У разі відсутності даних про співвідношення постійних та змінних втрат у номінальному режимі, враховуючи, що к.к.д двигуна близький до свого максимального значення при приблизно 80% навантаженні, можна прийняти, що в цьому режимі змінні втрати дорівнюють постійним, тобто

$$P_{\text{зм}} = P_{\text{пост}}.$$

Враховуючи, що при 80% навантаженні струм двигуна також приблизно дорівнює 80% від номінального, втрати в обмотках дорівнюватимуть $0,8^2 = 0,64$ від номінальних і дорівнюватимуть постійним втратам. Тоді останні в номінальному режимі складуть приблизно 1/3 від загальних втрат двигуна, тобто можна вважати, що в номінальному режимі

$$P_{\text{зм}} \approx 2P_{\text{пост}} \approx \frac{2}{3} \Sigma P \quad (3)$$

Очевидно, що в цьому випадку $a_1 \approx 1,5$.

З урахуванням (1) і (2) маємо

$$T = \frac{C \tau_y}{\Sigma P}.$$

Враховуючи, що в двигуні в режимі *S2* його робоча температура обмежена параметром τ_{ep} , рівняння теплового балансу набуде вигляду

$$\tau_{ep} = \tau_y \left(1 - e^{-\frac{t \cdot \Sigma P}{C \tau_y}} \right).$$

Після перетворень одержимо

$$\ln \left(1 - \frac{\tau_{ep}}{\tau_y} \right) = -\frac{t \cdot \Sigma P}{C \tau_y}.$$

Дане рівняння найпростіше вирішити графічно, побудувавши криві $\ln \left(1 - \frac{\tau_{ep}}{\tau_y} \right) = f(\tau_y)$ і $-\frac{t \cdot \Sigma P}{C \tau_y} = f(\tau_y)$, точка перетину яких дасть значення τ_y – значення температури, до якої нагрівся би двигун, призначений для роботи з номінальним навантаженням в короткочасному режимі *S2*, якщо він використовувався би в тривалому режимі *S1*. Очевидно, що в цьому випадку $\tau_y > \tau_{ep}$.

Щоб вийти на режим $\tau_y = \tau_{ep}$, сумарні втрати повинні зменшитися в $k_t = \frac{\tau_y}{\tau_{ep}}$ разів за рахунок зменшення лише змінних втрат або з урахуванням співвідношення (3) змінні втрати повинні зменшитися до значення

$$P_{\text{неп}}^1 = \frac{\Sigma P}{k_t} - \Sigma P \left(1 - \frac{1}{a_1} \right) = \Sigma P \left(\frac{\tau_{ep}}{\tau_y} - 1 + \frac{1}{a_1} \right).$$

Відповідно струм (і потужність) повинні зменшитися в

$$k_I = \sqrt{\frac{P_{\text{зм}}}{P_{\text{неп}}^1}} = \sqrt{\frac{1}{a_1 \left(\frac{\tau_{ep}}{\tau_y} - 1 + \frac{1}{a_1} \right)}} \text{ раз,}$$

що при $a_1 = 1,5$ складе

$$k_I = \frac{0,82}{\sqrt{\frac{\tau_{ep}}{\tau_y} - \frac{1}{3}}}.$$

З отриманого виразу видно, що при $\tau_{ep} < 3\tau_y$ тривалий режим двигуна неможливий навіть на холостому ходу, тобто тільки одних втрат у сталі може бути достатньо для того, щоб порушити тепловий режим двигуна при тривалій роботі. Це може статися, якщо час роботи для режиму *S2* невеликий (обчислюється хвилинами).

Слід зазначити, що при проектуванні наведений випадок використання двигуна, призначеного для роботи в режимі *S2*, в довготривалому режимі *S1* не є типовим, тому що номенклатура двигунів, призначених для роботи в довгостроковому режимі, незрівнянно більше номенклатури двигунів для короткочасного режиму. Однак слід пам'ятати, що при експлуатації за малого дозволеного часу для режиму *S2* використання двигуна в довготривалому режимі навіть при малому навантаженні може порушити його тепловий режим.

Розрахунок теплових параметрів двигуна у режимі S2 за відомими параметрами режиму S1.

Припустимо, що потрібно розрахувати час t , протягом якого двигун, призначений для роботи в тривалому режимі *S1* потужністю $P_{\text{ном}}$ може розвивати задану потужність $P_{\text{макс}}$ в короткочасному режимі *S2*.

Якщо це асинхронний двигун, насамперед потрібно зіставити задану потужність із мак-

симально можливими параметрами двигуна, зокрема, із кратністю максимального моменту

$$k_m = \frac{M_{\max}}{M_{\text{ном}}},$$

де M_{\max} і $M_{\text{ном}}$ – максимальний та номінальний моменти двигуна відповідно, що відповідають максимальній та номінальній потужності.

У разі, якщо задане перевантаження перевищує зазначену кратність по моменту (а, отже, і потужності), двигун просто може «не потягнути», і робота у вказаному режимі буде неможлива не тільки через теплові обмеження. Якщо задане навантаження не перевищує граничних параметрів двигуна, час, протягом якого двигун може розвивати задану потужність, можна визначити наступним чином.

Через коефіцієнт змінних втрат a_1 постійні втрати у двигуні становитимуть

$$P_{\text{пост}} = \Sigma P - P_{\text{зм}} = P_{\text{зм}} (a_1 - 1).$$

При заданому навантаженні (за потужністю, моментом або струмом), яке по відношенню до номінального навантаження визначиться як $\frac{P}{P_{\text{ном}}}$, струм в обмотках зросте в зазначене число разів, втрати в міді збільшаться в $\left(\frac{P}{P_{\text{ном}}}\right)^2$ разів, сумарні втрати в двигуні зростуть до значення

$$\Sigma P^1 = P_{\text{пост}} + P_{\text{зм}} \left(\frac{P}{P_{\text{ном}}}\right)^2 = P_{\text{зм}} \left[a_1 - 1 + \left(\frac{P}{P_{\text{ном}}}\right)^2 \right]$$

Нове значення перегріву, що встановилося, складе

$$\tau_y^1 = \frac{\Sigma P^1}{A} \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Тоді рівняння теплового балансу набуде вигляду

$$\tau_{\text{сп}} = \tau_y^1 (1 - e^{-t/T}), \quad (4)$$

рішення якого щодо t дає:

$$t = -T \ln \left(1 - \frac{\tau_{\text{сп}}}{\tau_y^1} \right).$$

Зворотне завдання можна сформулювати так: яку потужність може віддати двигун протягом заданого часу t ?

З рівняння теплового балансу (4) для t -хвилинної потужності, допустимому перегріві τ та постійній часу нагрівання T випливає:

$$\tau_y^1 = \frac{\tau_{\text{сп}}}{1 - e^{-t/T}}.$$

Щоб досягти такої температури в сталому режимі, сумарні втрати повинні збільшитися і скласти

$$\Sigma P^{11} = \tau_y^1 \cdot A.$$

Змінні втрати при цьому повинні збільшитися в $k = \frac{\Sigma P^{11} - P_{\text{пост}}}{P_{\text{зм}}}$ разів.

Струм двигуна, а отже, момент і потужність повинні зрости в \sqrt{k} разів, а t -хвилинна потужність P_t і момент M_t складуть:

$$P_t = P_2 \cdot \sqrt{k}, \quad M_t = M_{\text{ном}} \cdot \sqrt{k}.$$

Проте, як і попередньому випадку, розраховане значення P_t має місце, коли момент і потужність двигуна не обмежені максимальними параметрами його, зокрема, кратністю максимального моменту.

Якщо ж розрахований за параметром k перевантажувальний момент перевищує кратність моменту k_m , то за розрахунковий максимально можливий момент слід брати M_{\max} двигуна, взятий з каталогу. Крім того, слід враховувати можливе зниження M_{\max} при дозволеному стандартом 10% зниженні напруги живлення. Тому реальне обмеження за максимальним моментом (і потужністю) становить

$$0,9^2 M_{\max} \approx 0,8 M_{\max}.$$

Висновки. Наведені аналітичні зв'язки основних режимів роботи на основі теплової моделі асинхронного електропривода дозволяють оперативно вирішити питання взаємозаміни двигунів, а наведену методику розрахунку можна використовувати не тільки для основних $S1$ - $S3$, але й для усіх $S1$ - $S10$ режимів роботи.

Список літератури:

1. Онлайн-журнал «Толковый электрик». Режимы работы электродвигателей. URL: <http://electric-tolk.ru/rezhimy-raboty-elektrodvigatelj/> (дата звернення: 09.03.23).
2. Кацман М.М. Электрический привод. Москва, 2011. 384 с.
3. Чиликин М.Г., Сандлер А.С. Общий курс электропривода. Москва, 1981. 576 с.
4. Красовский А.Б. Основы электропривода. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана 2015. 405 с.
5. Школа для электрика. Режимы работы электродвигателей. URL: <http://electricalschool.info/spravochnik/maschiny/365-rezhimy-raboty-jelektrodvigatelj.html> (дата звернення: 09.03.23).

Gouoschapov S.S., Kolebanov O.K. INTERCONNECTION OF THE LOADING MODES OF THE ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE

In modern ships, asynchronous motors for various purposes and operating in various modes are widely used. For pumps and fans, electric motors are used that are designed to operate in a continuous (S1) mode, for anchor and mooring devices – motors operating in a short-term (S2) mode, for loading and unloading mechanisms – motors operating in a repeated-short-term (S3) mode. At the same time, the industry produces special-purpose electric motors designed to operate only in one of the specified modes. However, in practice, the question often

arises as to what loads the engine is designed, for example, for continuous operation, during operation in short-term and intermittent-short-term modes. The inverse problem may also be relevant: calculating the permissible power of an engine designed for a short-term or intermittent mode when used in a continuous mode. In this article, an attempt is made to establish a quantitative relationship between the indicated modes and a technique for recalculating the operating modes of an electric motor from one to another. The calculation of engine modes is based on the operation of its thermal model. In this case, only the catalog data are used as initial data: power, current, efficiency, weight, insulation class, for asynchronous motors the multiplicity of the maximum torque. The computational problem is subdivided into several subtasks: determination of the engine power in continuous mode, intended for operation in intermittent mode (direct and inverse problems); calculation of engine power in continuous operation according to its known parameters for short-term operation and determination of permissible power for short-term operation according to known parameters of continuous operation, taking into account the maximum possible overload capacity of the motor by torque.

Key words: *engine, temperature, heat balance, power, load, loss, constant heating time.*

ПРИЛАДИ

УДК 621.3

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.2.1/06>**Дядюн Н.А.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Корнєв В.П.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ПРИСТРІЙ НИЗЬКОРІВНЕВОГО ТЕСТУВАННЯ АВТОМОБІЛЬНОЇ ШИНИ ДАНИХ CAN

Головна ціль пристрою, що описується, спростити процес діагностики автомобільної електроніки, а саме електронних блоків керування, які поєднані між собою за шиною даних CAN. Досвід показує, що можливо створити пристрій, який би відповідав певним вимогам практики. Розроблений пристрій буде доцільним при низькорівневій діагностиці електронної системи автомобіля. Перевагою розробки є повноцінний доступ до шини даних CAN, який майже завжди обмежений при використанні спеціалізованого діагностичного обладнання [1]. Окрім цього, функціонал девайсу розширюється наявністю двох незалежних контролерів CAN та підвищуючим перетворювачем живлення до 24V. Пряме підключення до комп'ютера і можливість використовувати розробку як HID (Human Interface Device) пристрій ще більше розширює його можливості і призначення. Все це разом робить прилад більш універсальним і придатним для застосування дослідження як легкової так і вантажної техніки, а процес діагностики досить ефективним, і в деяких випадках значно швидшим. Відмічено, що процедура проведення діагностики істотно ускладнюється не досконалістю, а часто і відсутністю документації на вузли електронної системи автомобіля. Особливо це стосується техніки, яка останнім часом потрапляє в Україну, особливі умови експлуатації якої спонукають до більш частого обслуговування і ремонту. Тому важливим і актуальним є створення засобів і методики проведення такої низькорівневої діагностики в умовах неповної інформації про електронну систему автомобіля. Розглянуті в роботі приклади тестування деяких вузлів конкретного вантажного автомобіля можна вважати початком розробки такої методики, основаної на принципах так званого «реверс інжинірингу» складних систем.

Ключові слова: автомобіль, шина даних CAN, низькорівнева діагностика, реверс інжиніринг, передача даних.

Постановка проблеми. Сучасний автомобіль пронизаний сотнями метрів дротів різноманітного призначення. З плином часу кількість технологій, що використовується одночасно тільки зростає, а це приводить в свою чергу до необхідності поєднувати блоки керування між собою додатковими провідниками. Однак навіть не це підштовхнуло на розробку CAN, а перспектива легкої реалізації нового функціоналу, зручного обміну даними між всіма блоками керування в рамках однієї мережі. З цією метою на початку 80х років 20 століття було розпочато роботу над розробкою нового мережевого стандарту.

Відома компанія Bosch в 1983 році провела аналіз існуючих систем послідовної передачі даних, проте ні одна з взятих не покривала

повністю вимог, які ставилися до автомобільного інжинірингу. Того ж року розпочалася робота над новою системою, яка потім отримала назву CAN (Controller Area Network). На самих початкових фазах проекту були залучені інженери з Mercedes-Benz для розробки специфікації, а також спеціалісти з Intel. В лютому 1986 року на конгресі SAE (Society of Automotive Engineers) світ побачив CAN [2]. Мережевий протокол був побудований на арбітражі доступу [3], коли повідомлення з найвищим пріоритетом опрацьовувалися в першу чергу без затримок. Вже на той час було реалізовано декілька механізмів відслідковування помилок та можливість автоматичного відключення несправного блоку від шини.

Першими протокол CAN в чіпі реалізували Intel в середині 1987 року – це був 82526, трохи згодом свою мікросхему випустила Philips з назвою 82C200. Чіпи мали деякі відмінності, проте фактично виконували одну й ту ж функцію – зняти необхідність в обробці, прийому і відправці, фільтрування пакетів з мікроконтролера або мікропроцесора. Першими ж, хто застосував CAN вже на практиці стали Mercedes-Benz та BMW, які з початку 1991 року розпочали встановлювати просту мережу для поєднання блоків керування двигуном та іншими критично важливими електронними вузлами [4]. Знайти шину даних CAN в ті роки можна було тільки в люксових моделях автовиробників, наприклад BMW 7 серії.

Аналіз існуючих рішень. Кожен автовиробник надає свій діагностичний пристрій і відповідне до нього програмне забезпечення для діагностики автомобіля, де враховуються особливості електронної системи транспортного засобу. В таких програмах, окрім виведення кодів помилок, можливості проведення параметрії, можна знайти ще й рекомендації по ремонту для тої чи іншої помилки, які зводяться до принципу «перевірити це, якщо ні – наступний крок». В продажі можна знайти також універсальні пристрої, або ж багато-маркові, які можуть працювати з широким спектром марок і моделей автомобілів. Наприклад, широко розповсюджений серед аматорів і навіть професіоналів справи Autocom [5]. Його вартість значно нижча за дилерський пристрій, але найголовнішою перевагою є те, що купивши такий девайс, можна діагностувати майже всі легкові автомобілі, так само, як і значну частину вантажних і комерційних транспортних засобів. Недоліком є універсальний доступ до електронної системи авто, тому деякі функції будуть недоступні. Також великий ризик втратити доступ до електронного блока керування у випадку неправильної послідовності дій, збою при передачі тощо.

Постановка завдання. Мета розробки пристрою є можливість діагностувати вузли автомобіля, що підключені до шини даних CAN, з безпосереднім доступом до них. Використання широко спеціалізованих або навіть дилерських діагностичних пристроїв може не забезпечити повноту даних, які можна побачити або змінити. Описаний девайс має велику перевагу – це перегляд всього потоку даних, що проходять в шині, можливість виявити недостачі, або некоректність в повідомленнях. Також, з допомогою такого пристрою відкривається можливість не тільки діа-

гностувати, а і симулювати роботу окремо взятого блоку керування або виконуючого пристрою.

Однією з цілей розробки є можливість одночасної роботи з двома незалежними мережами, для чого потрібно використовувати два контролери шини CAN. На відміну від 1990 років, вибір елементної бази зараз набагато ширший і більш доступний. В якості контролера слугує мікросхема MCP2515 виробника Microchip, а також CAN трансивер в мікросхемі TJA1050 виробника NXP. Контролери шини реалізують обмін даними з мікроконтролером з допомогою послідовної шини SPI. В якості мікроконтролера обрано досить поширений ATmega32u4, можливості якого покривають поставлені потреби в об'ємі пам'яті, кількості входів/виходів і швидкодії. Окрім того, мікросхема може працювати в режимі HID пристрою, що відкриває масу додаткових застосувань. Блок схема вузла, що підключений до шини даних CAN наведено на рис. 1 [4].

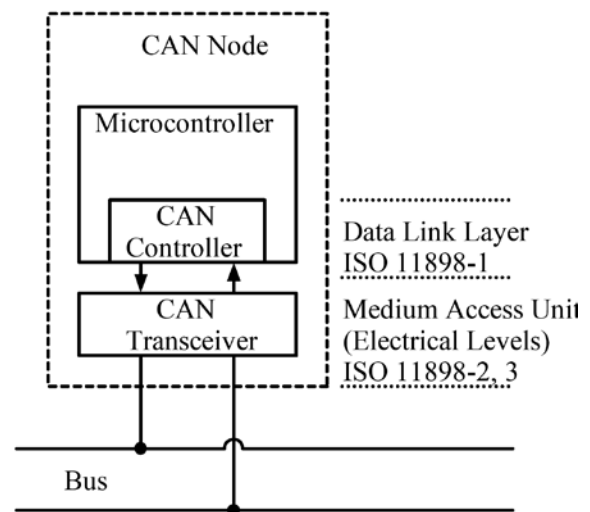


Рис. 1. Схема вузла, що підключений до шини CAN

Як видно, кожен вузол повинен мати:

- Мікроконтролер, або мікропроцесор, який би відправляв, отримував і опрацьовував дані;
- CAN контролер, який формуватиме пакети даних, займатиметься обробкою помилок, сигналізуванням про них, і багато чого іншого на рівні прийому-передачі;
- CAN трансивер, який буде контактувати з фізичною шиною даних, перетворювати рівні напруги, забезпечувати захист тощо.

Всі вузли фізично з'єднані між собою звичайною двопровідною шиною. Дроти являють собою скручену пару з номінальним опором 120 Ом. Стандарт ISO 11898 [6] розширює межі до 108 ÷ 132 Ом.

Опис функціонування та особливостей шини даних CAN. Мережевий протокол реалізує дуже цікавий механізм передачі повідомлень – так званий арбітраж доступу [3]. Оскільки шина даних є послідовною, при одночасній передачі можуть виникнути колізії, що призводить до затримок, втрат даних і інших неприємних явищ.

Один пакет CAN окрім корисних даних розміром до 8 байт, має системні та контрольні поля, і одним з важливих є поле арбітражу. Фактично поле арбітражу представляє собою ідентифікатор пакету. В залежності від призначення шини, поле може бути як 11 бітним, так і 29 бітним. Чим менший ID пакета, тим більший його пріоритет, це наочно зможемо побачити нижче на часовій діаграмі сигналів. Коли серед декількох вузлів, що передають дані буде обрано лише один – з найвищим пріоритетом, решта перейде в режим прослуховування. Це один з недоліків механізму – повідомлення з досить низьким пріоритетом можуть ніколи не відправитися.

На рисунку 2 наведено приклад часових діаграм сигналів, коли в шині, на якій підключено чотири вузли, одночасно починається передача пакетів даних.

Бачимо, що після передачі признаку початку пакета (Start Of Frame) на шині починається формування ідентифікаторів всіх чотирьох пакетів. Для цього застосовується механізм логічного «І». Кожен вузол, що передає дані, перед встановленням наступного рівня на шину перевіряє її стан. Якщо в мережі зараз встановлений домінуючий рівень (що є фактично «логічний нуль») – вузол

може встановити тільки такий же домінуючий рівень. Інакше – вузол переводиться в режим прослуховування.

Таким чином серед всіх пакетів як пакет найвищого пріоритету обирається той, кількість домінуючих бітів (коли на шині низький логічний рівень) в ідентифікаторі якого найбільша.

Специфікація CAN поділена на три абстрактних рівня, а саме [8]:

- **Об’єктний рівень (Object layer)** – представляє собою безпосередньо повідомлення (пакети). Забезпечує фільтрування, встановлення статусів передачі, обробку нових пакетів.

- **Рівень передачі (Transmit layer)** – більшість стандартів CAN опирається якраз на цей рівень, оскільки саме він представляє собою детектування помилок, підтвердження повідомлень, арбітраж доступу, формування нових пакетів, дотримання таймінгів та багато чого іншого, але не менш важливого. Цей рівень стоїть над фізичним, та проводить безпосередню обробку даних.

- **Фізичний рівень (Physical layer)** – фактично забезпечує дротове з’єднання вузлів між собою. Головними вимогами є загальний опір шини, який має становити 120 Ом, термінуючі резистори, які є методом подавлення шумів та відбивання сигналів. Окрім цього, рівень встановлює стандарти на кольори дротів, з’єднувачі (роз’єми), що застосовуються, інші вказівки на придушення шумів та завад, рівні напруги домінуючого і рецесивного станів. Час від часу фізичний рівень поповнюється рекомендаціями задля покращення

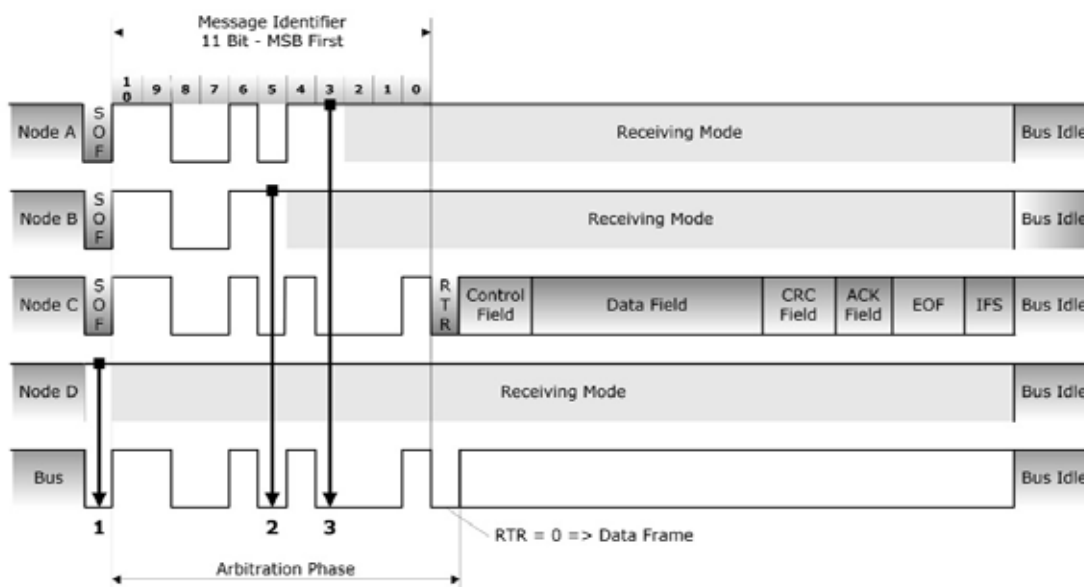


Рис. 2. Часова діаграма сигналів при одночасній відправці пакетів

передачі, зменшення ризику втрати повідомлення.

Мікросхеми-контролери CAN шини в проекті мають досить високу швидкість обміну даними до 1Mbps, чого більш ніж достатньо для використання майже з будь якою технікою.

До речі специфікація CAN ISO 11898 [6], що розроблена Bosch, пропонує два варіанти швидкостей шин даних [7]:

- **High Speed CAN** – найбільш розповсюджений стандарт, швидкість передачі даних в якому становить від 40 Кбіт/с до 1 Мбіт/с. Кожен кінець шини має термінуватися резистором номіналом 120 Ом.

Приклад часової діаграми передачі даних показано на рисунку 3.

- **Low Speed CAN, або Fault Tolerant CAN** – реалізує швидкість передачі даних від 40 Кбіт/с до 125 Кбіт/с. Характеризується можливістю продовжувати передачу інформації навіть при пошкодженні одного з провідників. Термінуючий резистор при цьому встановлюється у кожному з вузлів на шині. Приклад передачі даних на рисунку 4.

З наведених на рисунку діаграм стає чітко видно, як низько швидкісна шина CAN може продовжувати передачу даних навіть при пошкодженні одного з дротів [8].

Справа в тому, що кожен з сигнальних провідників (CANH і CANL) мають свої доміантний і рецесивний рівні, на відміну від High Speed CAN, де CANH представляє собою провідник тільки для встановлення доміантного рівня на шині, а CANL тільки рецесивного. Рівні сигналів перекривають один одного, що враховується трансиверами. При виникненні пошкодження, шина переходить на одно дрововий режим.

Деяко незвичними можуть показатися терміни доміантного і рецесивного стану. Специфікація CAN уникає використання станів шини як логічні 1 або 0, замість цього прийнято вживати слова рецесивний і доміантний рівні відповідно. Головна умова для фізичного рівня – це можливість доміантного рівня подавлювати рецесивний і не навпаки.

Термінуючі резистори [9] застосовують в мережі незалежно від швидкості передачі даних

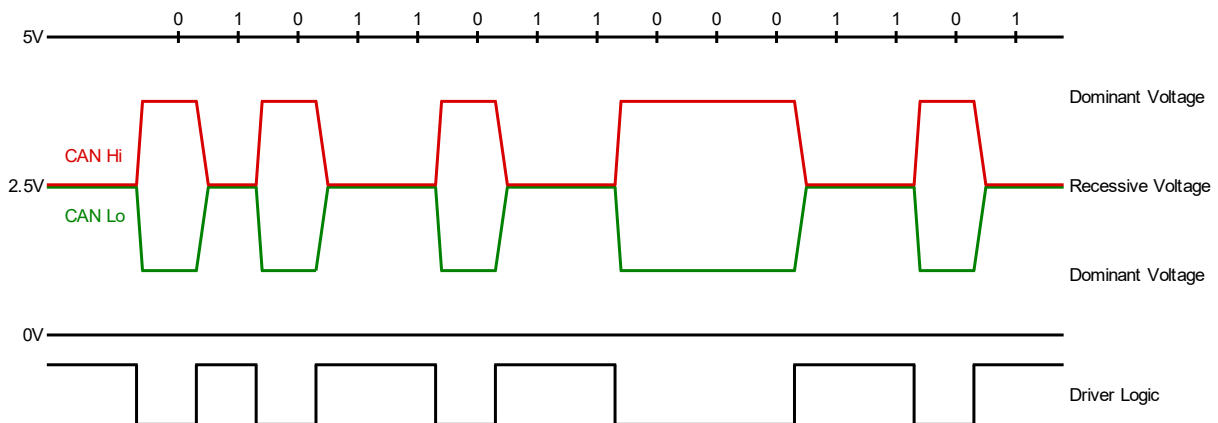


Рис. 3. Часова діаграма сигналу High Speed CAN

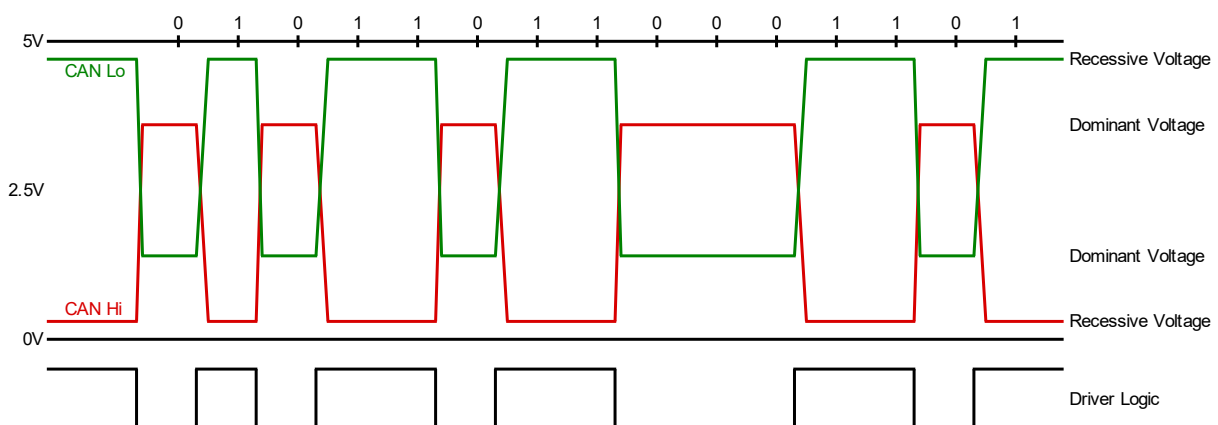


Рис. 4. Часова діаграма сигналу Low Speed CAN або Fault Tolerant CAN

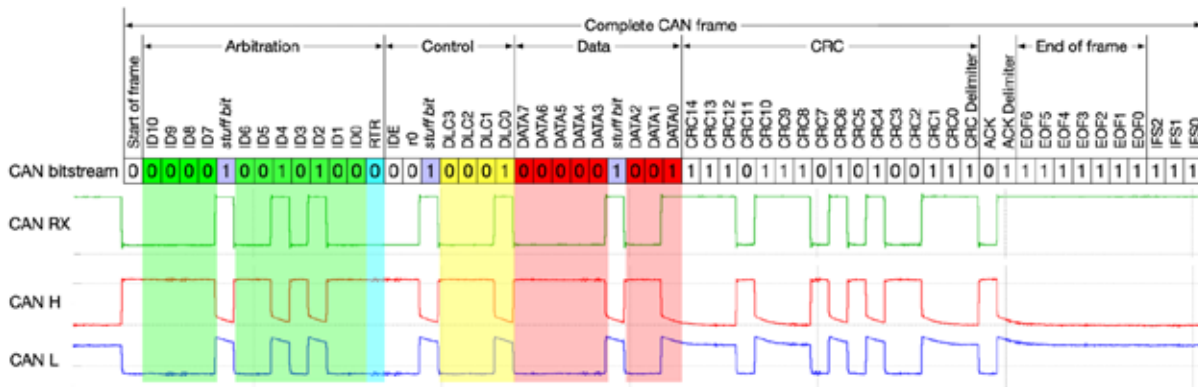


Рис. 5. Приклад передачі одного пакету даних в мережі CAN

в ній. Питання лише в якій кількості і де. Використання такого опору зумовлене можливістю відбивання сигналу на кінцях кабелю або впливом електромагнітних завад. Сила цих явищ тільки зростає зі збільшенням швидкості передачі даних і зростанням довжини кабелю. Описані проблеми можуть пошкоджувати сигнал, а гасіння напруги на кінцях шини забезпечує якісну передачу сигналу. На платі розробленого пристрою встановлені два термінуючих резистори, які підключаються до шини з допомогою перемикачів, що забезпечує швидке їх вмикання в електричне коло.

Завершуючи теорію, звернемо увагу на приклад передачі одного пакету даних на шині CAN зображений на рис. 5. На часовій діаграмі зображено логічний стан на шині (CAN RX), і напруги на лініях CANH та CANL. Зеленим кольором виділено передачу поля арбітражу, синім – біт закінчення поля арбітражу. Жовтим помічено передачу DLC, або довжини корисних даних. Червоним – корисні дані. Решта це чек-сума, і індикація закінчення пакету. При передачі даних видно, що стани на лініях CANH і CANL змінюються інверсно, разом з витою парою це забезпечує збільшену завадостійкість. До того ж бачимо, що у випадках, коли кількість бітів, що йдуть поспіль один за одним і мають нульове значення (тобто в лінії тривалий час не змінюється низький рівень), доходить до 5-ти, у бітову послідовність примусово вставляється одиничний біт (*stuff bit*), з ціллю зниження ймовірності помилок у наслідок можливої втрати синхронізації.

Схемотехнічні і конструктивні рішення. На рисунку 6 надано схему електричну принципову пристрою, яку виконано з поблочним поданням функціонально завершених елементів. Окрім мікроконтролера, і двох CAN інтерфейсів, на схемі також є два USB Type-C роз'єми для забезпечення

живлення і передачі даних до комп'ютера, дві тактові кнопки загального призначення (для завдання режимів роботи пристрою), декілька світлодіодів для індикації стану та DC-DC перетворювач для підвищення живлення до 24В.

На рисунку 7 показано вид монтажної сторони друкованої плати, що розроблена згідно схеми електричної принциповій пристрою, а на рис. 8 фото зібраної плати.

Розглянемо основні рішення, що стосуються програмної підтримки роботи пристрою. Оскільки специфікація CAN, вимагає виконання конкретних умов тільки для фізичного рівню, то реалізація верхніх шарів протоколу, а значить і їх програмна реалізація залишається більш вільною для розробника. А значить для пристрою, що розроблено, може бути або написана власна програма, яка б виконувала тільки певні алгоритми, підтримуючи завданий функціонал, або використане існуюче готове програмне забезпечення. Для першого тестування пристрою вирішено обрати другий варіант. Оскільки схематично і апаратно пристрій підтримуватиме протокол Lawicel [10], то це дає можливість використовувати існуюче програмне забезпечення для перегляду CAN шини.

Експериментальні випробування пристрою. Вирішено перевірити роботу пристрою в декількох режимах, а саме у *режимі прослуховування*, коли відбувається врізання в діючу шину для перегляду в неї реального потоку даних, і в *режимі трансивера*, коли генерування і передача даних в мережу здійснюється самим пристроєм.

Для першого режиму до моторної і інформаційної CAN мереж автомобіля DAF XF105 були підключені відповідні сигнальні дроти. Налаштувавши необхідні опції в програмі CAN Viewer, обравши потрібний USB порт і швидкість передачі даних, розпочато процес прослуховування.

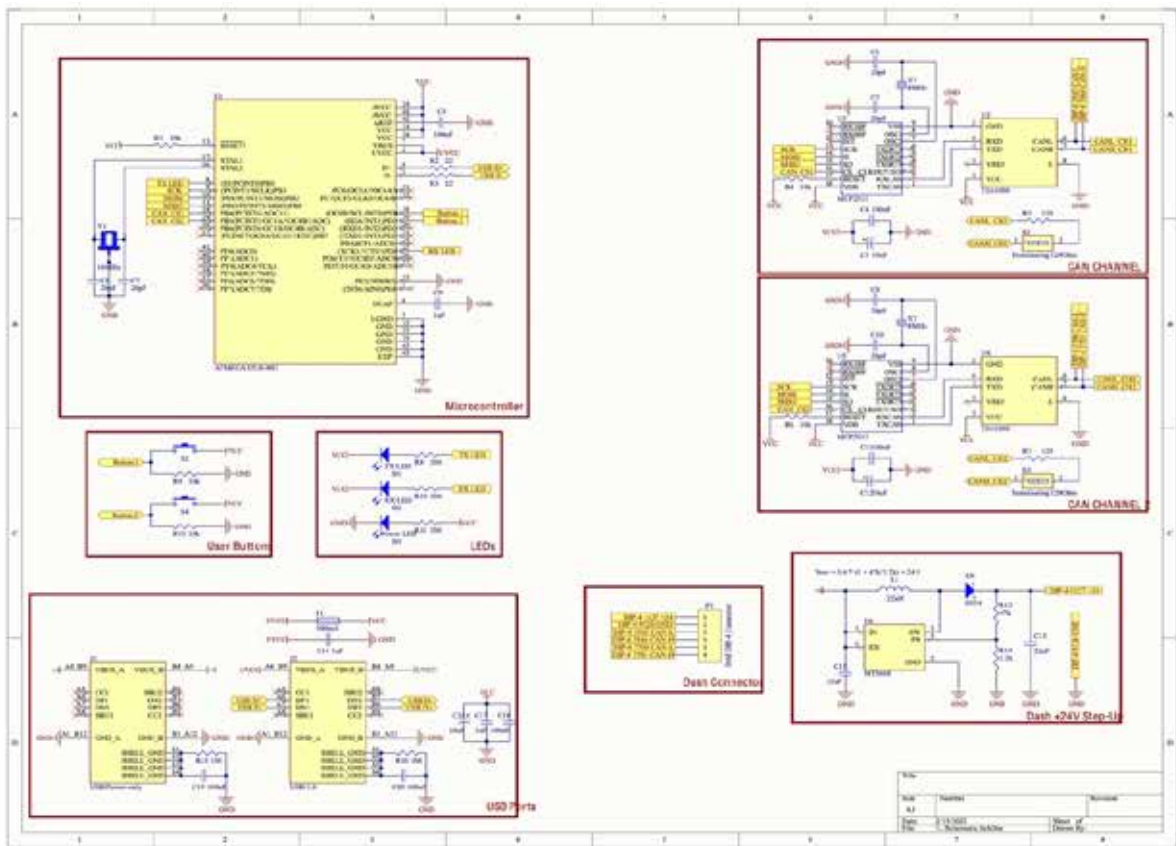


Рис. 6. Електрична принципова схема розробленого пристрою

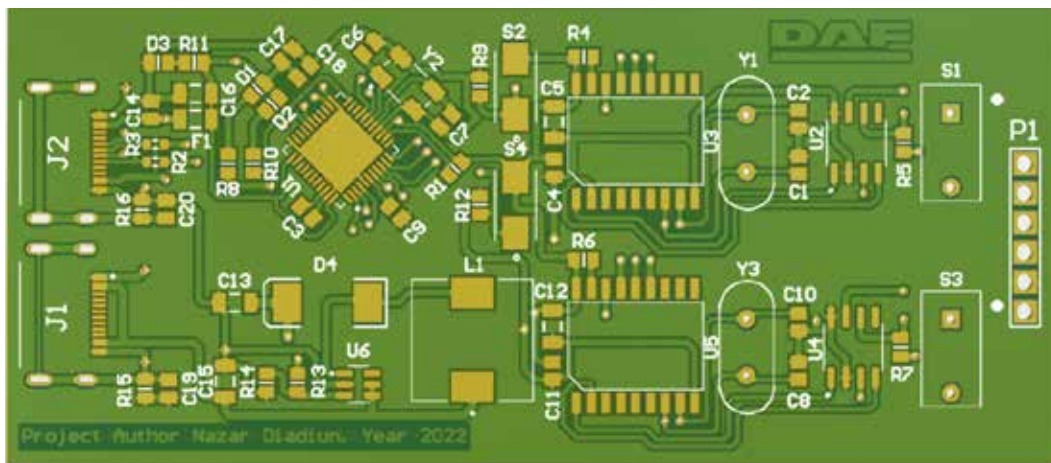


Рис. 7. Зовнішній вигляд друкованої плати

Оразу ж на екрані комп'ютера, підключеного до пристрою, відобразилися безліч повідомлень з різноманітними ідентифікаторами і даними всередині (рис. 9).

На рисунку видно декілька полів, перші три відповідають за відносний час з початку запису, ідентифікатор пакету і довжину даних в ньому. Решта – корисні дані в шістнадцятковій системі. Наочно видно щільність передачі даних. Інтервал становить 10-20 мс. Враховуючи, що на рисунку показано відфільтрова-

ний потік даних, які мають лише одну адресу пакетів, то у реальному потоці можуть бути сотні пакетів від різних пристроїв на шині.

Для тестування в режимі трансивера до пристрою була підключена панель приборів від того ж автомобіля. Оскільки на платі є підвищуючий перетворювач живлення, то піклуватися про забезпечення панелі напругою від зовнішнього джерела не потрібно. Достатньо просто підключити ще один USB кабель.

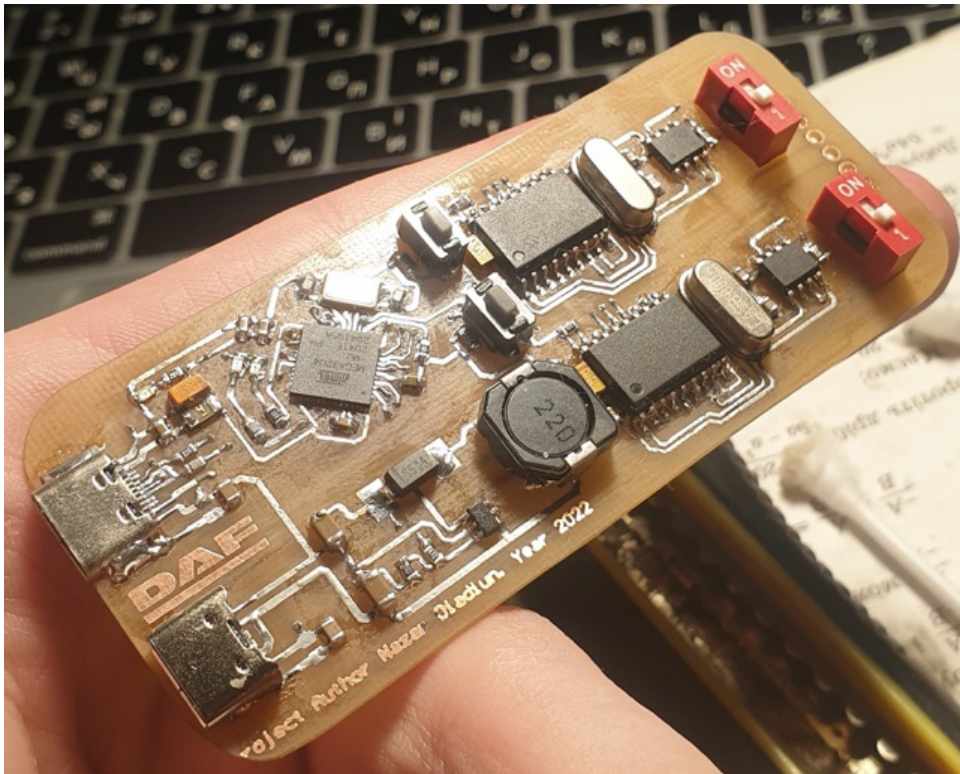


Рис. 8. Готовий вид друкованої плати з змонтованими на ній елементами

05.787	18FF3527	8	22	0	0	0	0	0	0	0
05.816	18FF3527	8	10 0F	0A	0A		1	0	0	0
05.826	18FF3527	8	21	0	0	0	0	0	0	0
05.836	18FF3527	8	22	0	0	0	0	0	0	0
05.866	18FF3527	8	10 0F	0A	0A		1	0	0	0
05.875	18FF3527	8	21	0	0	0	0	0	0	0
05.885	18FF3527	8	22	0	0	0	0	0	0	0
05.956	18FF3527	8	22	0	0	0	0	0	0	0
05.985	18FF3527	8	10 0F	0A	0A		1	0	0	0
06.000	18FF3527	8	21	0	0	0	0	0	0	0
06.007	18FF3527	8	22	0	0	0	0	0	0	0
06.034	18FF3527	8	10 0F	0A	0A		1	0	0	0
06.047	18FF3527	8	21	0	0	0	0	0	0	0
06.055	18FF3527	8	22	0	0	0	0	0	0	0
06.084	18FF3527	8	10 0F	0A	0A		1	0	0	0
06.099	18FF3527	8	21	0	0	0	0	0	0	0
06.107	18FF3527	8	22	0	0	0	0	0	0	0
06.133	18FF3527	8	10 0F	0A	0A		1	0	0	0
06.147	18FF3527	8	21	0	0	0	0	0	0	0
06.155	18FF3527	8	22	0	0	0	0	0	0	0
06.183	18FF3527	8	10 0F	0A	0A		1	0	0	0
06.199	18FF3527	8	21	0	0	0	0	0	0	0
06.206	18FF3527	8	22	0	0	0	0	0	0	0
06.223	18FF3527	8	10 0F	0A	0A		1	0	0	0
06.273	18FF3527	8	10 0F	0A	0A		1	0	0	0
06.283	18FF3527	8	21	0	0	0	0	0	0	0
06.294	18FF3527	8	22	0	0	0	0	0	0	0
06.305	18FF3527	8	10 0F	0A	0A		1	0	0	0
06.312	18FF3527	8	21	0	0	0	0	0	0	0
06.323	18FF3527	8	22	0	0	0	0	0	0	0
06.352	18FF3527	8	10 0F	0A	0A		1	0	0	0
06.363	18FF3527	8	21	0	0	0	0	0	0	0

Рис. 9. Отриманий файл за 500 мс часу

Спочатку у режимі прослуховування протягом декількох десятків хвилин записувався *Log-файл* даних з CAN шини реального автомобілю. Протя-

гом цього часу було проініційовано різноманітні важелі, що спричиняли ту чи іншу індикацію на панелі приладів (було запущено двигун, змінені



Рис. 10. Результат роботи пристрою в режимі трансивера в парі з панеллю приладів

його оберти і т.п.). Після запису файл було збережено. Для тестування в режимі трансивера, збережений файл відкрито знову, і всі дані, які було записано з визначеним інтервалом відправлялися через пристрій на панель приладів. Одразу після початку передачі даних на панелі приладів ввімкнулося підсвічування шкал приборів і екрану, здвинулися стрілки (рис. 10).

Причому індикатори вмикалися в такому ж хронологічному порядку, як і раніше вони вмикалися в автомобілі. На рисунку також видно, що швидкість руху, як це було і на реальному автомобілі, становить 50 км/г, а оберти двигуна близько 1300 об/хв. Це підтверджує дієвість очікуваної здатності пристрою симулювати реальні процеси, шляхом відправки відповідних пакетів у CAN шину.

Ще одне можливе застосування даного пристрою є певний реверс інжиніринг, коли при підключенні до шини «всліпу» знімається список пакетів за якийсь час, потім аналізується і робиться висновок про кількість і призначення даних, що передаються. Навіть без наявності опорного списку повідомлень можна проводити визначення належності пакетів, наприклад, для виконуючих пристроїв. В даному випадку панель приладів є таким пристроєм, а отже, простим спамом пакетів в її шину можна спостерігати вмикання індикаторів, здвиги стрілок, з чого робити певні висновки.

Слід відмітити, якщо на більш ранню електроніку автомобілів вже можна знайти якісь записи, технічну документацію і просто опис пакетів, напри-

клад, для блоку керування двигуном, то на пізніші моделі авто такого просто не буде. Використання описаного приладу і описаної методики зможе значно допомогти при визначенні несправності.

Додатковим, але не менш корисним призначенням можна назвати режим роботи шлюзу. Нерідкісні випадки, коли один або декілька агрегатів в автомобілі зазнають зміни на інші. І часто агрегати, що змінюються, мають інше покоління від решти електроніки автомобіля, що унеможливить їх роботу в парі. Кожен пакет даних несе в собі велику роль, і є незамінним при роботі всіх механізмів і електроніки, тому знаючи необхідні повідомлення, їх ідентифікатори і відповідні дані, можна всередині мікроконтролера видозмінювати пакети, надсилаючи їх далі в іншу шину. Таким чином, автомобіль буде «вважати», що електроніка агрегату рідна, а той же двигун – «вважатиме», що керується рідним блоком керування двигуна.

Висновки. Розглянуто історичні відомості щодо розробки та еволюції мережевого протоколу CAN. При аналізі декількох стандартів специфікації ISO 11898 приділено увагу особливостям фізичного рівня CAN шини. Це дало можливість сформулювати певні вимоги до структури пристрою, а саме, що крім стандартних функціональних блоків він має містити вбудований перетворювач напруги, для роботи з пристроями, живлення яких потребує 24В. Також необхідним стала наявність двох незалежних контролерів шини CAN. Все це сприяло прийняттю правиль-

них схемотехнічних і конструктивних рішень, що було експериментально підтверджено.

Проаналізовані джерела мережі інтернет на наявність існуючих та відкритих протоколів для роботи з шиною CAN, на які можна було б опиратися задля сумісності з існуючим зручним програмним забезпеченням.

Пристрій було протестовано в двох режимах роботи, а саме – в режимах прослуховування і трансиверу. Отримані результати навіть на такому простому розглянутому у статті прикладі, дають можливість стверджувати, що розроблений пристрій має великий потенціал для спрощення процесу діагностики автомобільної електроніки, і цілі, які покладалися на пристрій були досягнуті в повній мірі.

Також було доведено декілька додаткових можливих варіантів використання девайсу, які значно розширюють спектр його призначень. Результати випробування пристрою в режимі трансивера із опрацьованими спробами симулювання роботи

певних вузлів автомобілю, відкривають перспективи створення в наступному віртуальних повномасштабних тренажерів автомобілів, які можуть посприяти значному полегшенню і скороченню початкових етапів підготовки користувачів нової техніки.

Окрім використання в автомобілях, мережевий протокол приймає важливу роль в функціонуванні авіаційної та залізничної техніки, автоматизації будинків та індустріальних системах, медичних приладах та аграрній техніки. Маючи відповідні опорні записи, їх можна із застосуванням пристрою відтворювати у шині автомобілю або іншій технічній системі, чим самим спостерігати відмінності в поведінці у випадку несправностей. А це значить, що розглянуті в роботі приклади процедури тестування CAN шини, основаної на принципах реверс інжинірингу складних систем, можна вважати початком розробки методики низькорівневої діагностики різноманітних технічних систем із застосуванням розробленого пристрою.

Список літератури:

1. Діагностичне обладнання для роботи з автомобілями марки DAF. URL: <https://ad-instrument.com.ua/ua/p26071705-dilerskij-skaner-daf.html>. (Дата звернення 21.03.2023).
2. Історія виникнення CAN. URL: <https://www.can-cia.org/can-knowledge/can/can-history/>. (Дата звернення 19.03.2023).
3. Арбітраж доступу в мережі CAN. URL: <https://copperhilltech.com/blog/controller-area-network-can-bus-bus-arbitration/> (Дата звернення 19.03.2023).
4. Загальні відомості, опис шини даних CAN. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/CAN_bus . (Дата звернення 19.03.2023)
5. Універсальний діагностичний пристрій Autocom. URL: <https://originaldiag.com/collections/autocom-diagnostics/products/autocom-cdp-flex-with-3-month-license> (Дата звернення 28.03.2023).
6. Опис стандарту ISO 11898. URL: <https://www.iso.org/standard/63648.html>. (Дата звернення 21.03.2023).
7. Опис фізичних рівнів CAN. URL: <https://knowledge.ni.com/KnowledgeArticleDetails?id=kA00Z0000019LzHSAU> (Дата звернення 11.03.2023).
8. Опис фізичних рівнів і термінації шини CAN . URL: https://www.rpi.edu/dept/ecse/mps/CAN-LabVIEW_info/NI-Tutorial-9759-en.pdf. (Дата звернення 18.03.2023).
9. Використання і призначення термінуючих резисторів в мережі CAN . URL: <https://support.maxongroup.com/hc/en-us/articles/360009241840-CAN-bus-topology-and-bus-termination>. (Дата звернення 16.03.2023).
10. Опис протоколу Lawicel. URL: https://www.canusb.com/files/can232_v3.pdf (Дата звернення 28.03.2023).

Diadiu N.A., Kornev V.P. DEVICE FOR LOW-LEVEL DIAGNOSING OF AUTOMOTIVE CAN DATA BUS

The main purpose of the described device is to simplify the process of diagnosing automotive electronics in particular electronic control units, which are interconnected using a CAN data bus. Experience shows that it is possible to create a device that would meet certain requirements. The developed device will be appropriate for low-level diagnostics of the electronic system of the car. The advantage of development is full access to the CAN data bus, which is almost always limited when using specialized diagnostic equipment [1]. In addition, the functionality of the device is expanded by the presence of two independent CAN controllers and an up-converter of power supply to the 24V. A direct connection to a computer and the ability to use device as a HID (Human Interface Device) device further expands its capabilities and purpose. All this together makes the device more versatile and suitable for the study of both passenger and cargo equipment, and the diagnostic

process is quite effective, and in some cases much faster. The work also notes that the diagnostic procedure is significantly complicated not by perfection, but often by the lack of documentation for the electronic system of the car. This is especially true of equipment that has recently come to Ukraine, the special operating conditions of which encourage more frequent maintenance and repair. Therefore, it is important and relevant to create tools and methods for holding such low-level diagnostics in conditions of incomplete information about the electronic system of the car. The examples of testing some components of a particular truck considered in the work can be considered the beginning of the development of such a technique based on the principles of the so-called "reverse engineering" of complex systems.

Key words: *automotive, CAN data bus, low-level diagnosing, reverse engineering, data transfer.*

УДК 681.2:687.522(045)
DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.2.1/07>

Монченко О.В.

Національний авіаційний університет

Мовчан Н.С.

Національний авіаційний університет

Чубко Л.С.

Національний авіаційний університет

Марченко Н.Б.

Національний авіаційний університет

Ковтонюк І.Ю.

Національний авіаційний університет

ПОКРАЩЕННЯ ТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИЛАДУ ДЛЯ УСУНЕННЯ ДЕФЕКТІВ ШКІРИ

Нездоровий вигляд шкіри завдає великий дискомфорт людині, це відчутно впливає на її фізіологічний та психологічний стан. На сьогодні існує безліч методів апаратної косметології, що можуть усунути наявні проблеми зі шкірою та покращити життя людини в цілому. Одним з рішень є використання приладу для дарсонвалізації. Апаратна косметологія станом на 2022 рік дуже сильно розвилася та має шалений попит у споживачів. Метод дарсонвалізації не потребує значних навичок під час виконання даної процедури. Однак, існує й протилежна сторона, яка полягає в тому що даний прилад працює однаково при різних типах шкіри. Тип шкіри грає важливу роль при застосуванні методу, адже цей аспект впливає на результат отриманий після дарсонвалізації, тому це потребує опису кожного із сигналів при певному типі шкіри. Метою є модифікація апарату для місцевої дарсонвалізації шляхом розробки нових конструкторських блоків та автоматизації процесу дарсонвалізації.

Методикою реалізації є створення моделі автоматизованої системи «Вихідний каскад високовольтного блоку»; вимірювального перетворювача «Опір шкіри – напруга»; ПІС-мікроконтроллер для збільшення ефективності приладу при різних типах шкіри з покращеними технічними характеристиками.

Результатом дослідження буде забезпечення автоматичного підбору необхідної напруги, високої ефективності використання, зменшення ризиків надмірної дії випромінювання, скорочення часу для проведення процедури. Так як система є автоматичною, то до її складу входить «Вихідний каскад високовольтного блоку» з використанням IGBT-транзистора, що регулює імпульсну характеристику, то застосування автоматизованої системи є розумним з точки зору ефективності, безпечності, легкості використання і ціни. Таким чином, створений удосконалений апарат «Дарсонваль» має збільшену ефективність та зменшений надлишковий вплив на ділянки шкіри.

Ключові слова: апарат «Дарсонваль», шкіра, автоматизована система, вихідний каскад високовольтного блоку, вимірювальний перетворювач, опір, напруга, IGBT-транзистор, ПІС-мікроконтроллер, ефективність.

Постановка проблеми. Актуальною проблемою є створення методу керування вихідного сигналу за допомогою автоматизованої системи та вимірювального перетворювача, адже на даний час в світі досить гостро стоїть питання ефективності, універсальності та зменшення часу на косметологічні послуги.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Робота Яненка О.П., Куценка В.П., Перегудова С.М. присвячена теоретичним і практичним дослідженням конструкції апарату для дарсонва-

лізації та методиці її проведення [6]. У роботі [11] авторидосліджують проектування вимірювальних медичних пристроїв з мікропроцесорним управлінням, а саме розглядають методи керування системою вимірювання за допомогою мікроконтроллерів, але не розглядається робота контролерів в косметологічному обладнанні.

Постановка завдання. Завдання полягає в удосконаленні конструкції апарату для дарсонвалізації, шляхом введення в неї автоматизованої системи.

Автоматизовані системи є універсальним інструментом для практичної реалізації цього завдання.

Виклад основного матеріалу дослідження. Структурна схема апарату для місцевої дарсонвалізації включає в себе блок живлення, генератор імпульсних сигналів G1 частотою 110 кГц, модулятор U1, помножувач напруги U2, вихідний підсилювач A2, електроди E1 та E2 (рис. 1) [6].

Генератор формує напругу частотою 100 кГц; двіноподібні імпульси кратністю 50 Гц пропускають на модулятор U1, а потім на помножувач напруги U2, де напруга підвищиться до рівня 30 кВ і через буферний підсилювач A1 приєднується до електродів E1 та E2 [6].



Рис. 1. Структурна схема апарату для дарсонвалізації

Характеристики вже існуючого приладу для дарсонвалізації мають такі показники: максимальна сила струму: 0.2 мА; струм: 200 мкА; частота: 50 Гц; частота заповнення імпульсів: 120 кГц; частота проходження пачок імпульсів: 100 Гц; вихідна напруга до 60 кВ; вихідний струм 200 мкА; форма вихідного сигналу – імпульсний з високочастотним заповненням [5]. Апарат генерує коронарний електричний заряд, який проникає в підшкірні шари, не порушуючи цілісності шкіри. У підшкірних тканинах виникають електромагнітні коливання, які сприятливо впливають на інтенсивність обміну речовин і кровообігу. Амплітуду напруги на виході можна змінювати за допомогою регулятора на корпусі трансформатора. Трансформатор і генератор з'єднані між собою шнуром. Для обробки різних поверхонь тіла прилад комплектується набором спеціальних електродів зі скла різної форми [5].

1. Моделювання автоматизованої системи

В програмному середовищі Electronics Workbench була створена модель автоматизованої системи «Вихідний каскад високовольтного блоку» з використанням IGBT-транзистора (рис. 2), за допомогою якої є можливість регулювати основні параметри імпульсної послідовності (шпаруватість та частоту) [9].

При тому, що 1кВ пробиває 1мм шкіри, для того аби пробити 1 см шкіри необхідна напруга імпульсу (напруга вторинної обмотки трансформатора) 10 кВ (рис. 3). Тоді напруга первинної обмотки трансформатора повинна становити приблизно 10 В, а кількість витків обмотки трансформатора – 1000 витків [9].

$$\frac{U_1}{W_1} = \frac{U_2}{W_2}$$

$$\frac{W_2}{W_1} = \frac{U_2}{U_1}$$

$$U_2 = U_1 \cdot \frac{W_2}{W_1}$$

$$U_2 = 10 \cdot 1000 = 10 \text{ (кВ)}$$

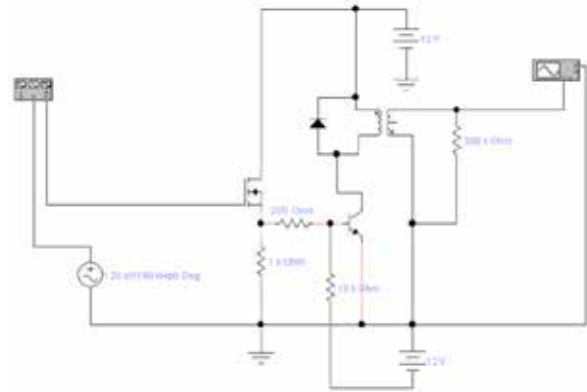


Рис. 2. Модель автоматизованої системи «Вихідний каскад високовольтного блоку»

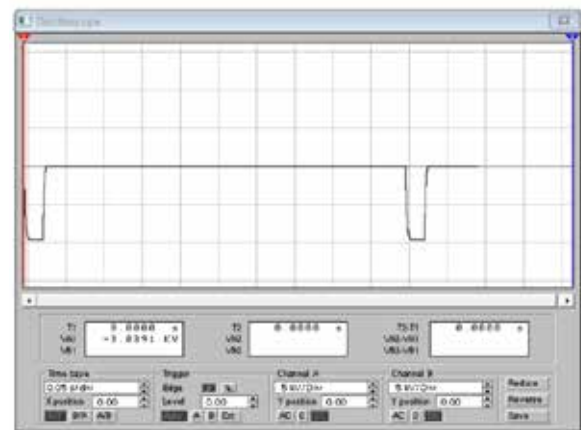


Рис. 3. Імпульси вихідної послідовності

2. Модернізований апарат «Дарсонваль»

Додавши до будови приладу автоматизовану систему «Вихідний каскад високовольтного блоку» з використанням IGBT-транзистора та вимірювальний перетворювач «Опір шкіри – напруга» модернізований апарат матиме структурну схему як на рис. 4 [9].

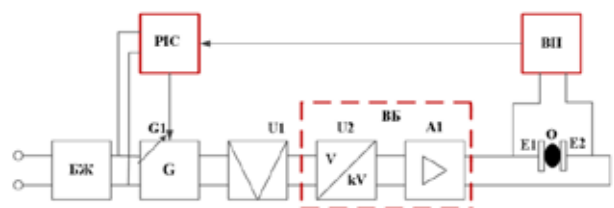


Рис. 4. Модернізована структурна схема апарату «Дарсонваль»

Модернізована структурна схема апарата для місцевої дарсонвалізації включає в себе:

1. Блок живлення (БЖ);
2. Вимірювальний перетворювач (ВП);
3. ПІС – мікроконтроллер (ПІС);
4. Генератор імпульсних сигналів (G1);
5. Модулятор (U1);
6. Високовольтний блок (ВБ), що включає в себе помножувач напруги (U2) та вихідний підсилювач (A1);
7. Електроди (E1) та (E2) [9-11].

3. Моделювання вимірювального перетворювача

Наступним етапом удосконалення апарату «Дарсонваль» є створення вимірювального перетворювача, за допомогою якого можливо вимірювати вологість шкіри шляхом вимірювання її опору. В програмному середовищі ElectronicsWorkbench була створена модель вимірювального перетворювача «Опір шкіри – напруга» (рис. 5) [9].

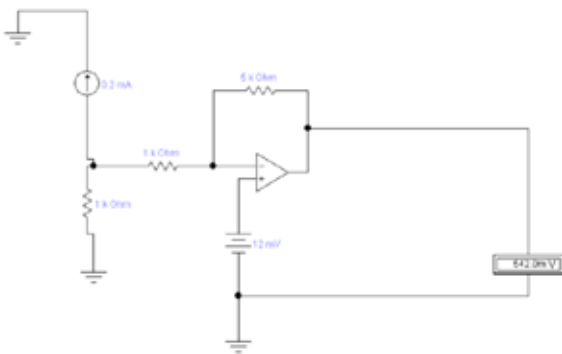


Рис. 5. Вимірювальний перетворювач «Опір шкіри – напруга»

В даному випадку опір шкіри становить $5 \cdot 10^3$ Ом. При цьому вихідна напруга становитиме 542 мВ, її можна розрахувати за формулою:

$$U_x = I_0 \cdot R_u \cdot \frac{R_x}{R_0}$$

Для перевірки моделі виконаємо обчислення вимірюваного опору (R_x), для цього в моделі задається опір шкіри $R_{xmin} = 10^3$ Ом та $R_{xmax} = 10^4$ Ом (рис.6 і 7) [9].

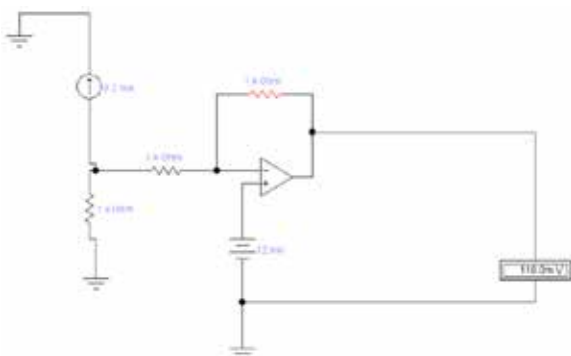


Рис. 6. Вимірювальний перетворювач «Опір шкіри – напруга» при опорі шкіри 10^3 Ом

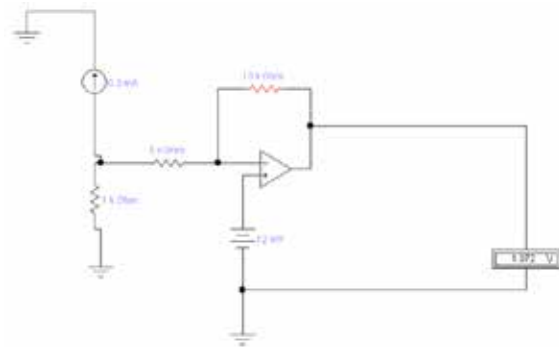


Рис. 7. Вимірювальний перетворювач «Опір шкіри – напруга» при опорі шкіри 10^4 Ом

Розрахункове значення опору шкіри:

$$R_x = \frac{U(R_x) - U(R_{xmin})}{U(R_{xmax}) - U(R_{xmin})} \cdot (R_{xmin} - R_{xmax}) + R_{xmin}$$

$$R_x = \frac{542 - 118}{1072 - 118} \cdot (1000 - 100) + 1000$$

$$R_x = 5 \cdot 10^3 \text{ Ом.}$$

Отже, вимірюване та розрахункове значення збігаються, тому створена модель є правильною і придатною до застосування [9].

Для управління апаратом до блоку вимірювального перетворювача додається ПІС мікроконтроллер, основна характеристика якого є висока швидкість виконання команд (рис. 8) [9].

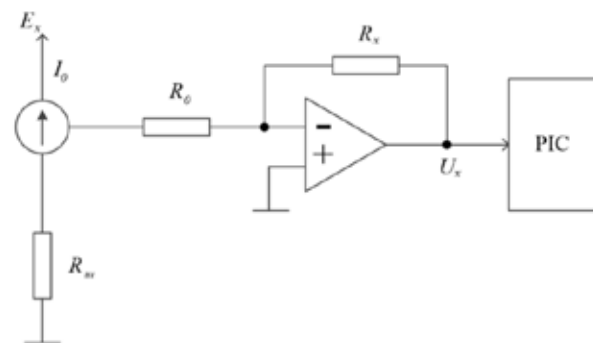


Рис. 8. Вимірювальний перетворювач з ПІС мікроконтроллером

4. Створення алгоритму роботи ПІС

Косметологічні процедури з застосуванням апарату для дарсонвалізації виконуються при напрузі 7 – 12 кВ, то за основу можна взяти три значення напруги на виході автоматизованої системи «Вихідний каскад високовольтного блоку» – 7, 10 і 12 кВ відповідно для жирної, нормальної та сухої шкіри, тобто напруга на первинній обмотці повинна становити 7, 10 і 12 В відповідно [8].

Для роботи автоматизованої системи побудовано алгоритм, за яким здійснюватиметься програмування ПІС мікроконтроллера [8].

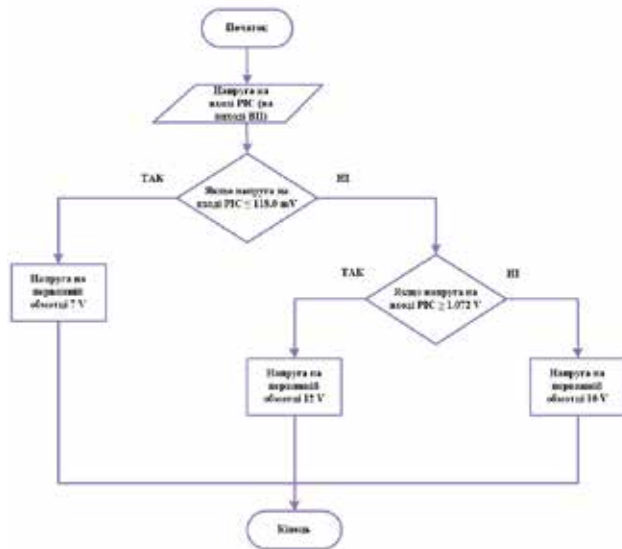


Рис. 9. Алгоритм програмування PIC

5. Вибір мікроконтролера архітектури PIC

Для керування апаратом «Дарсонваль» потрібен мікроконтролер який має [1]:

- 3 виходи для комутації блока високовольтного перетворювача на 7, 10 та 12 вольт,
- 1 вихід для комутації вимірювального перетворювача опору шкіри,
- 1 вхід для отримання аналогового сигналу від перетворювача опору шкіри [8].

Означену кількість портів мають багато контролерів у корпусі DIP-8 SO-8, до того ж вибирається відносно новий чіп. Таким критерієм відповідає PIC12F1501 [1].

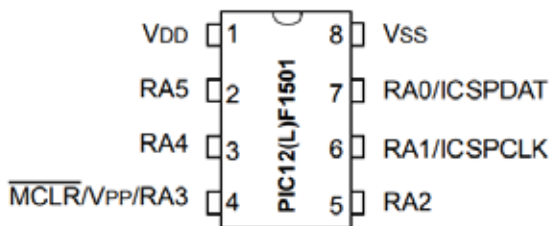


Рис. 10. Архітектура мікроконтролера PIC 12F1501

6. Створення схеми для симуляції

В даному випадку схема буде ілюстративною, щоб можна було побачити роботу алгоритму тобто, обирається модель контролера PIC12F1501, встановлюється анімовані моделі LED-індикаторів (які не симулюють характеристики світлодіода, тільки показують коли на піні контролера буде активний сигнал 1), також ставиться на схему елемент DC-генератор для імітації сигналу з перетворювача опору шкіри, та вольтметр для ілюстрації встановленої напруги [2, 3].

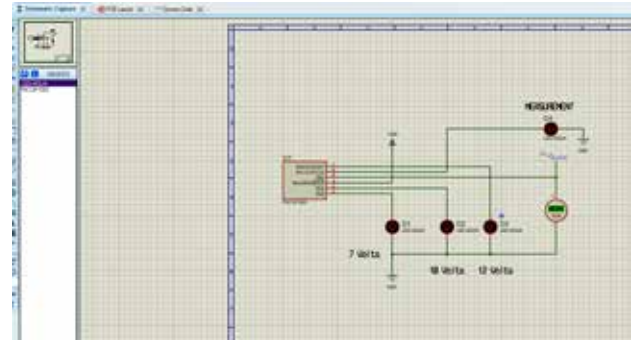


Рис. 11. Схема роботи алгоритму автоматизованої системи дарсонвалізації

Для симуляції роботи автоматизованої системи обираються три значення вхідної напруги на мікроконтролер, що відповідають значенням вологості шкіри при трьох типах – жирному, нормальному та сухому типу (табл. 1) [8]. Послідовно встановимо для тесту значення напруги, що приходить з вимірювального перетворювача.

Таблиця 1

Значення вхідної напруги при жирному, нормальному, сухому типі шкіри.

Напруга	Очікуваний результат	Коментар
112mB	RA5=1	Увімкнено 7В
500mB	RA4=1	Увімкнено 10В
1.1В	RA0=1	Увімкнено 12В

Відбувається вмикання комутації перетворювача RA1=1 на час вимірювання (160 мс). Схематично це відображено вмиканням діода D4 [8].

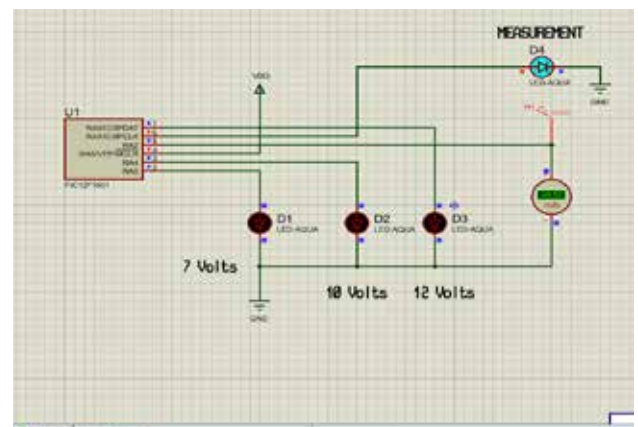


Рис. 12. Схема вмикання автоматизованої системи

Після вимірювань перетворювач вимкнено, на мікроконтролер подається напруга відповідна для жирного типу шкіри розміром 112 мВ, автоматично підбирається напруга на виході 7В [8].

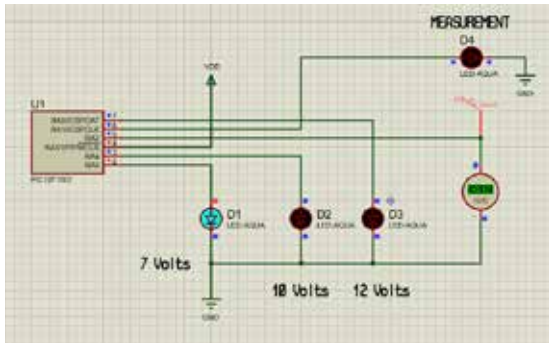


Рис. 13. Робота апарату при жирному типі шкіри

Далі, встановлюється 500 мВ, що характерна для нормального типу шкіри, на сигнал з перетворювача [8].

Під час проведення другого експерименту на виході відбувається комутація 10В [8].

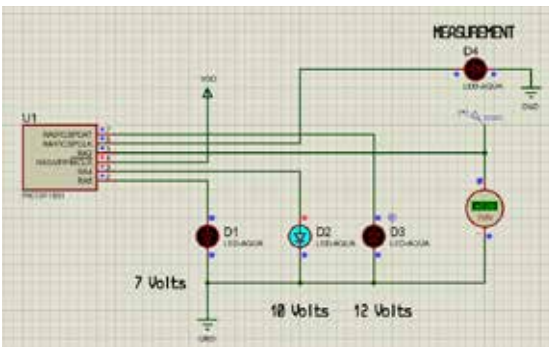


Рис. 14. Робота апарату при нормальному типі шкіри

Аналогічно, для сухого типу шкіри встановлюємо значення вхідної напруги на PIC – 1.1В – очікувана комутація 12В [8].

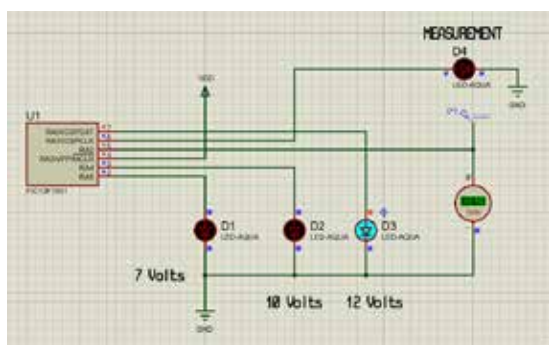


Рис. 15. Робота апарату при сухому типі шкіри

Для трьох випадків напруга первинної обмотки становитиме 7, 10 та 12 В, тоді напруга на вторинній обмотці трансформатора з 1000 витків становитиме 7, 10 та 12 кВ відповідно, що задовольняє

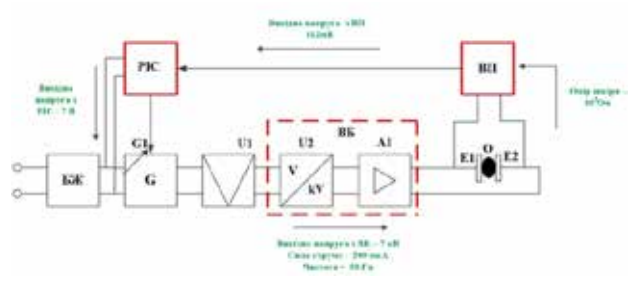


Рис. 16. Принцип роботи модернізованого апарату дарсонвалізації при жирному типі шкіри

значення напруги для ефективного виконання дарсонвалізації [8].

Принцип роботи модернізованого апарату для дарсонвалізації полягає у наступному:

1. Від скляної насадки на блок вимірювального перетворювача поступає опір, що вимірюється даним блоком;

2. У вимірювальному перетворювачі вхідний опір перетворюється на напругу і поступає до мікроконтролера.

3. Мікроконтролер отримує дані з вимірювального перетворювача, і задовольняє значення напруги, що задані алгоритмом роботи PIC.

4. Генератор формує напругу частотою 100кГц;

5. Дзвіноподібні імпульси кратністю 50 Гц пропускають на модулятор U1, а потім на помножувач напруги U2;

6. У помножувач напруги U2 напруга підвищиться до рівня 7кВ;

7. Напруга проходить через буферний підсилювач A1;

8. На електроди поступає струм силою 200мкА, частотою 50 Гц, напругою 7 кВ [8].

Висновки. Застосування методу дарсонвалізації у косметології дуже широке, а отже сам апарат потрібно підлаштовувати під кожен тип процедур та враховувати особливості шкіри пацієнтів. Тому було створено автоматизовану систему дарсонвалізації, аби підвищити ефективність методу. Завдяки введенню вимірювального перетворювача створена можливість вимірювати вологість шкіри, PIC – мікроконтролером управляти системою в залежності від типу шкіри, а високовольтним блоком з IGBT-транзистором регулювати основні параметри імпульсної послідовності.

Збільшення кількості блоків та регуляція параметрів імпульсів відносно типу шкіри дають можливість покращити технічні характеристики приладу для дарсонвалізації, а отже збільшить якість проведення процедури, зменшить час її проведення та мінімізувати надлишковий вплив на шкірні покриви.

Список літератури:

1. PIC12F1501. URL:<https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/40001615C.pdf> (дата звернення 15.04.2021).
2. MPLAB XC8 C Compiler: User's Guide. URL:<https://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/50002053g.pdf> (дата звернення 20.04.2021).
3. Proteus Manual. URL:https://www.ele.uva.es/~jesman/BigSeti/ftp/Cajon_Desastre/Software-Manuales/EBook%20%20Proteus%20Manual.pdf (дата звернення 09.04.2021).
4. Дарсонваль: что это и его применение. URL: <https://ortop.ua/darsonval-chto-eto-i-ego-primenenie> (дата звернення 11.04.2021).
5. Еднак В.І. Лікування дарсонвалем: оптимізуйте роботу організму за допомогою сучасного апарату. URL: <https://med-magazin.ua/ua/articles/view/455/> (дата звернення 12.04.2021).
6. Яненко О.П., Куценко В.П., Перегудов С.М. Електронна апаратура лікувально-діагностичних технологій: навчальний посібник / за ред. О.П. Яненка. Донецьк: ППШ «Наука і освіта», 2011. 212 с.
7. Карабут М.М., Гладкова Н.Д., Фельдштейн Ф.И. Фракционный лазерный фототермолиз в лечении кожных дефектов: возможности и эффективность. *СТМ*. 2016. №2. С. 98–108.
8. Мовчан Н.С. Автоматизована система дарсонвалізації: кваліфікаційна робота: спец. 163 «Біомедична інженерія»; Національний авіаційний ун-т. Київ, 2022. URL: https://drive.google.com/file/d/1Gy-Aqh6h5DU5e5ZePGTuNYxBRhj_AYZj/view.
9. Мовчан Н.С. Покращення технічних характеристик приладу для відновлення дефектів шкіри: дипломний проект: спец. 172 «Телекомунікації та радіотехніка»; Національний авіаційний ун-т. Київ, 2021. URL: <https://docs.google.com/document/d/1vfaixaMbtDIHkXG4i5A6RDyh5liGs00Q/edit>.
10. Монченко О.В., Мовчан Н.С. Модифікація структури апарату для дарсонвалізації. *Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем: матеріали XII міжнар. наук.-практ. конф. (Чернігів, 26–27 травня 2022 р.)*. Чернігів, 2022. Том 2. С. 195–196.
11. Строев В.М., Куликов А.Ю., Фролов С.В. Проектирование измерительных медицинских приборов с микропроцессорным управлением: уч. пособие. Тамбов: ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. 96 с.

Monchenko O.V., Movchan N.S., Chubko L.S., Marchenko N.B., Kovtoniuk I.Yu.

IMPROVEMENT OF TECHNICAL CHARACTERISTICS OF THE DEVICE FOR ELIMINATION OF SKIN DEFECTS

Unhealthy skin appearance causes great discomfort to a person, and it significantly affects the irphysiological and psychological state. Today, there are many methods of hard ware cosmetology that canel iminate existing skin problems and improve a person's life in general. One of the solutions is to use a device for darsonvalization. As of 2022, hardware cosmetology has developed a lot and is in great demand among consumers. The darsonvalization method does not require significant skills during this procedure. However, there is also a down side, which is that this device works the same way for different skin types. The skin type plays an important role in the application of the method, because this aspect affects the result obtained after darsonvalization, so it requires a description of each of the signals for a particular skin type. The aim is to modify the apparatus for local darsonvalization by developing new design blocks and automating the darsonvalization process.

The implementation methodology is to create a model of the automated system "Output stage of the high-voltage unit"; measuring transducer "Skin resistance – voltage"; PIC microcontroller to increase the efficiency of the device for different skin types with improve dtechnical characteristics.

There search will result in automatic selection of the required voltage, high efficiency of use, reduction of the risks of excessive exposure to radiation, and reduction of the time for the procedure. Since the system is automatic and includes the "Output stage of the high-voltage unit" using an IGBT transistor that regulates the impuls eresponse, the use of an automated system is reasonable in terms of efficiency, safety, ease of use and price. Thus, the create dimproved Darsonval device has increased efficiency and reduced excessive exposure to skin areas.

Key words: device "Darsonval", leather, automated system, output stage of the high-voltage unit, measuring transducer, resistance, voltage, IGBT transistor, RIS microcontroller, efficiency.

УДК 621.36

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.2.1/08>**Скакун О.В.**Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз
Служби безпеки України**Сивобородько А.В.**Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз
Служби безпеки України

ОГЛЯД ПОРТАТИВНИХ СУЧАСНИХ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ ДЛЯ ЕКОЛОГІЧНОГО КОНТРОЛЮ

Стаття присвячена оглядовому аналізу портативних сучасних засобів вимірювальної техніки для екологічного контролю.

Дано визначення таких важливих понять, як екоцид, екологічний контроль та екологічний моніторинг. Розглянуті питання екологічної безпеки в Україні. Відмічені потенційні напрямки та шляхи розвитку екологічного контролю в цивілізованому суспільстві.

Наведена класифікація засобів вимірювальної техніки, що застосовуються або можуть бути використані для екологічного контролю. Коротко описані універсальні та спеціалізовані засоби вимірювальної техніки для екологічного контролю, визначені перспективи та тенденції їх розвитку. Виконано огляд наукових праць та інших інформаційних масивів щодо засобів вимірювальної техніки для екологічного контролю.

Основний матеріал дослідження в запропонованій статті присвячений аналізу портативних сучасних засобів вимірювальної техніки для екологічного контролю, які виробляються провідними фірмами Європейського співтовариства та компаніями розвинутих країн Азії.

Проаналізовано особливості сучасних засобів вимірювальної техніки для контролю:

1) радіаційного стану навколишнього середовища;

2) стану чистоти повітря та наявності в ньому різних шкідливих складових.

Також у статті наведені марки (типи) та параметри портативних засобів вимірювальної техніки, які автори рекомендують використовувати для екологічного контролю.

Ключові слова: екоцид, екологічний контроль, екологічний моніторинг, засіб вимірювальної техніки, класифікація засобів вимірювальної техніки для екологічного контролю, універсальні та спеціалізовані засоби вимірювальної техніки для екологічного контролю, перспективи та тенденції розвитку засобів вимірювальної техніки для екологічного контролю.

Постановка проблеми. Із початку повномасштабного вторгнення Росії на територію України, дії російської окупаційної армії спричинили масштабне забруднення ґрунтів, повітряних мас, водних ресурсів, а також призвели до загибелі дуже великої кількості як свійських, так і диких тварин.

Так, з метою створення умов радіаційної загрози та паніки, в місті Києві у березні 2022 року російською армією вчинено підпалювання лісових масивів в Зоні відчуження Чорнобильської АЕС.

Вищезазначені дії армії Російської Федерації можливо трактувати як екоцид. Таки дії заборонені міжнародним правом.

Отже, жертвами російської військової агресії стали не лише люди, а й довкілля в Україні. Росія маніпулює екологічною безпекою. Такими діями вона загрожує кліматичній безпеці всього люд-

ства. Таким чином, після звільнення від ворога українських земель, задачі екологічного контролю стають першочерговими. Найбільш актуальні напрямки наступні: рівень радіаційного забруднення та запиленість атмосферного повітря.

Зазвичай екологічний контроль здійснюють за допомогою різноманітних засобів вимірювальної техніки (ЗВТ). Рекомендаціям щодо вибору портативних ЗВТ для екологічного контролю і присвячена ця стаття.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідженням актуальних проблемних питань з екологічної безпеки займалися такі вітчизняні науковці як О.М. Адаменко, Я.О. Адаменко, Л.М. Архипова [1], О.М. Адаменко, Л.В. Міщенко [2], І.М. Хилько [3], Л.Д. Яценко [4], В.М. Трегубчук [5] та інші. Вагомим є також внесок зарубіжних вчених. Це, зокрема, ґрунтовні праці

А.З. Вартанова, А.Д. Рубана, В.Л. Шкуратника [6], Е.Н. Озяковой [7].

Але питання обґрунтування та вибору сучасних ЗВТ для екологічного контролю, та рекомендацій щодо їх застосування в працях вищезазначених дослідників описані досить поверхнево або зовсім не розглянуті.

Існує досить значна кількість інших публікацій, які мають, як правило, інформаційно-довідковий (інколи рекламний) характер, або розміщені на електронних ресурсах провідних виробничих та дистриб'юторських компаній, що спеціалізуються на проектуванні, виробництві та (або) постачанні різноманітних ЗВТ [8, 9, 10].

Постановка завдання. Мета цієї статті – надати лаконічні описи та запропонувати певні рекомендації щодо вибору та оптимального застосування портативних сучасних ЗВТ для задач екологічного контролю. Автори розглядають лише технічні складові екологічного контролю, юридичні нюанси потребують окремих ґрунтовних досліджень.

Виклад основного матеріалу. В результаті воєнної агресії Росії природне середовище в Україні масштабно забруднене величезною кількістю різноманітних токсичних хімічних елементів, речовин та сполук. У цих умовах надзвичайно актуальним є завдання забезпечення в Україні екологічної безпеки населення. Загальновідомо, що найбільш ефективними засобами щодо запобігання екологічним катастрофам є методи та засоби спостереження за станом довкілля.

Методи та засоби спостереження і контролю за станом навколишнього середовища
Для отримання об'єктивної інформації про стан і рівень забруднення різних об'єктів навколишнього середовища необхідно мати надійні засоби і методи екологічного контролю.

Екологічний контроль – комплекс заходів за станом контролю та нагляду за довкіллям з метою перевірки планів і заходів щодо збереження та раціонального використання природних ресурсів, дотримання чинного законодавства в цій сфері та прийнятих нормативів якості навколишнього середовища. Здійснюється органами державної служби на всіх рівнях, а також громадськими та політичними організаціями [11].

Засоби екологічного контролю та спостереження поділяють на контактні, дистанційні (неконтактні) та біологічні, а контрольовані показники – на структурні (абсолютні (та) або відносні значення хімічних, фізичних або біологічних величин – рівень концентрації забруднюючої

речовини, коефіцієнт сумарного забруднення (та інші) та функціональні (продуктивність процесу, вірогідна оцінка кругообігу речовин та інші) [12].

Більш високим системним рівнем екологічного контролю є екологічний моніторинг, моніторинг довкілля, екомоніторинг – комплексна науково-інформаційна система регламентованих періодичних безперервних, довгострокових спостережень, оцінки і прогнозу змін стану природного середовища з метою виявлення негативних змін і вироблення рекомендацій з їх усунення або ослаблення [6, 12].

Контактні методи контролю довкілля
Контактні методи контролю навколишнього середовища можливо структурувати як класичні методи хімічного аналізу та сучасні методи інструментального аналізу. Класифікація контактних методів контролю наведена на Рис. 1.

Найчастіше застосовуються спектральні, електрохімічні та хроматографічні методи аналізу об'єктів навколишнього середовища (Рис. 2).

Дистанційні методи контролю навколишнього середовища

Контактні методи спостережень та контролю за станом природного середовища доповнюються неконтактними (дистанційними), що ґрунтуються на використанні двох властивостей зондувальних полів (електромагнітних, акустичних, гравітаційних): здійснювати взаємодії з контрольованим об'єктом та переносити отриману інформацію до датчика.

Автори статті пропонують аналіз сучасних засобів вимірювальної техніки, що використовуються для контактних методів контролю як найменш дорогих: 1) радіаційного стану навколишнього середовища; 2) стану чистоти повітря та наявності в ньому різних шкідливих складових.

Контроль радіаційного стану довкілля Російська агресія в Україні призводить до збільшення кількості виникнення надзвичайних ситуацій техногенного характеру, особливо в сфері радіаційного стану довкілля. Бойові дії безпосередньо впливають на формування радіоекологічної ситуації на території нашої країни. Під загрозою потенційної аварії знаходиться найбільша в Європі Запорізька АЕС, де вже декілька місяців «хазяйнують» окупанти. Це вимагає дослідження стану техногенно-екологічної небезпеки для навколишнього середовища.

Основним показником небезпеки радіоактивних речовин є **випромінювання**. Випромінювання радіоактивних речовин можуть бути трьох видів: гама,

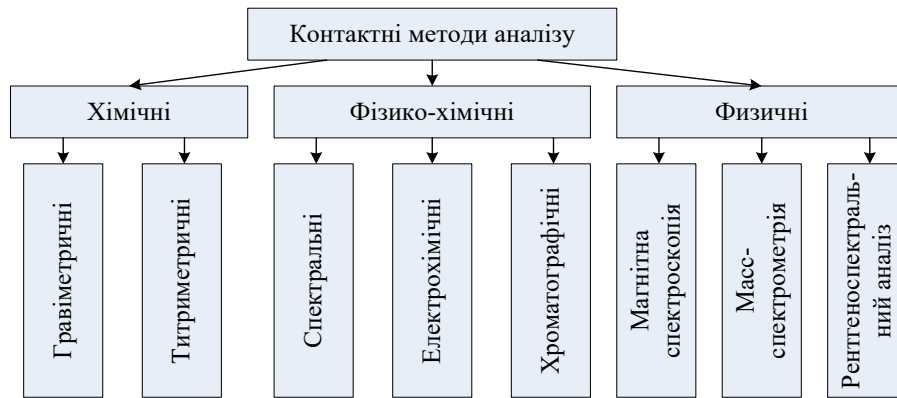


Рис. 1. Класифікація контактних методів контролю

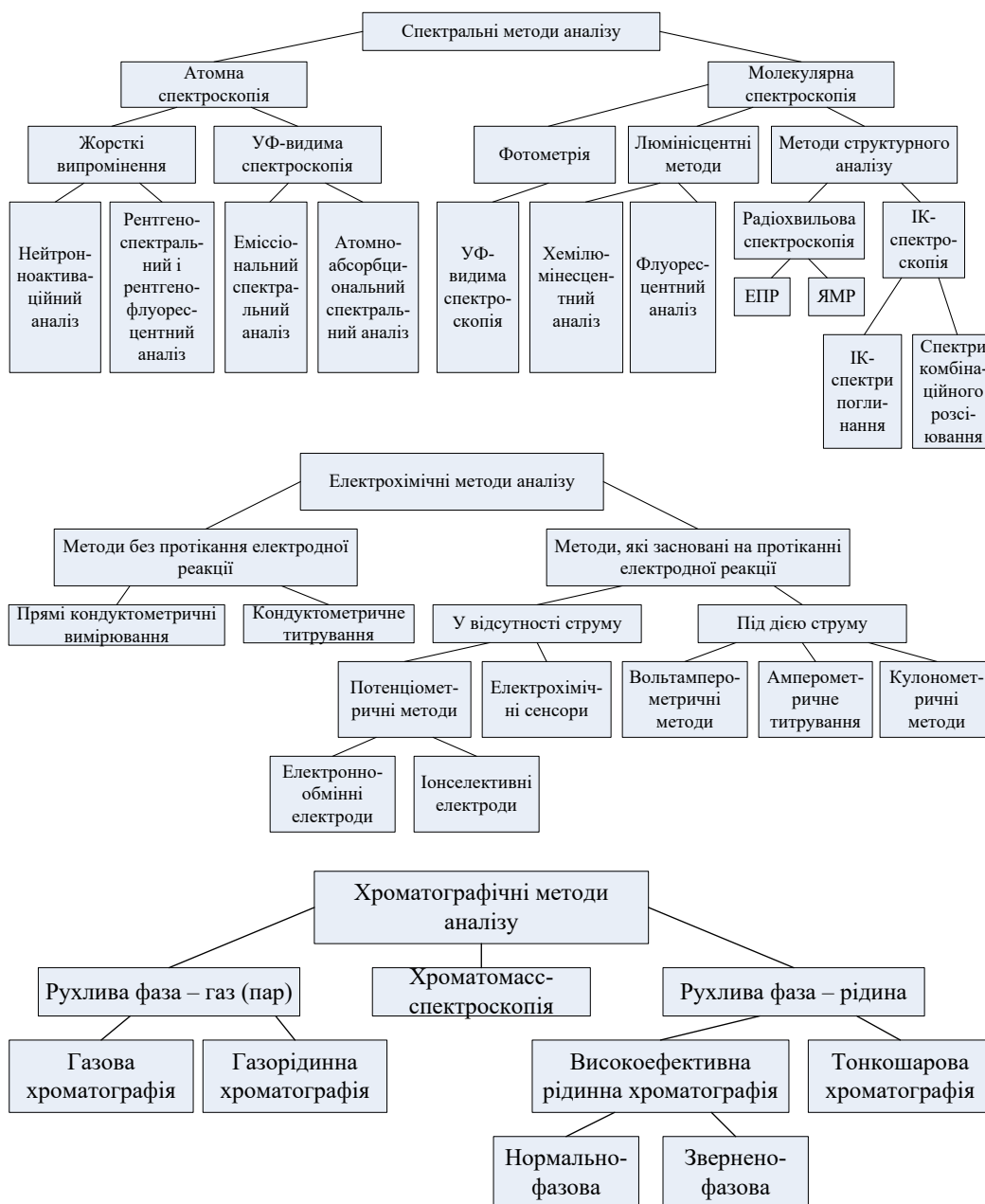


Рис. 2. Методи аналізу об'єктів навколишнього середовища

бета, альфа [13]. Гама-випромінювання (γ) – це електромагнітні хвилі, аналогічні рентгеновським променям. Поширюються в повітрі зі швидкістю 300 000 км/с. Проникають через товщу різноманітних матеріалів. Небезпечні для людей, іонізують клітини організму. Бета-випромінювання (β) – це потік електронів, які називаються бета-частинками. Швидкість їх руху досягає швидкості світла. Проникаюча здатність їх менша за гама-випромінювання, але іонізуюча дія в сотні разів більша. Альфа-випромінювання (α) – це потік ядер атомів гелію, які називають альфа-частинками. Найважлива висока іонізуюча дія. Область розповсюдження частинок у повітрі сягає всього 10 см, а в твердих та рідких тілах – ще менше.

Основною фізичною дозиметричною величиною, що використовується для оцінки міри дії випромінювання на середовище, є поглинута доза випромінювання.

Операційні величини, які використовуються при контролі середовища включають в себе амбієнтний еквівалент дози і напрямлений еквівалент дози. Амбієнтний еквівалент дози $H^*(10)$ – еквівалент дози в точці поля випромінювання, що створюється відповідно розширеним і вирівняним полем випромінювання в сфері з м'якої біологічної тканини (сфері МКРЕ) на глибині 10 мм по радіус-вектору, який має протилежний до поля напрямок. Направлений еквівалент дози $H'(d, \Omega)$ – величина еквівалентної дози в точці поля випромінювання, що створюється відповідним розтягуванням поля всередині сфери МКРЕ на глибині d в заданому напрямку Ω по радіусу. Індивідуальний еквівалент дози $H_p(d)$ – еквівалент дози в сфері МКРЕ на відповідній глибині d в певній точці тіла людини. Точкою на тілі людини зазвичай вибирають місце, де носить індивідуальний дозиметр. Одиницею вимірювання цих величин є зіверт (Зв). Зіверт (Зв) – одиниця еквівалентної дози іонізаційного випромінювання у системі SI [14].

Індивідуальна дозиметрія є дуже важливою частиною персонального захисту від негативних наслідків радіаційного опромінення. Вона включає: радіометричний контроль за забрудненістю шкіри і засобів індивідуального захисту; контроль за характером, динамікою і рівнями надходження радіоактивних речовин в організм з використанням методів прямої і непрямой радіометрії; контроль за дозами зовнішнього β -, γ - і рентгеновського випромінювань, а також нейтронів з використанням індивідуальних дозиметрів або розрахунковим шляхом.

Додатковими джерелами радіаційного навантаження є штучні радіонукліди, які потрапили в довкілля внаслідок вибухів воєнних ядерних пристроїв, радіаційних аварій, а також при мирному використанні атомної енергії.

Для виявлення та вимірювання радіоактивних випромінювань, радіоактивного забруднення різноманітних предметів, місцевості, продуктів харчування, фуражу, води застосовуються *прилади радіаційної розвідки*; для вимірювання поглинутих доз опромінення – *прилади дозиметричного контролю (контролю опромінення)* [15].

Радіаційна розвідка – комплекс вимірювань потужності іонізуючих випромінювань та ступеня зараження місцевості і об'єктів радіоактивними ізотопами. *Дозиметричний контроль* – комплекс організаційних і технічних заходів щодо визначення доз опромінення людей. Дозиметричний контроль проводиться з метою кількісної оцінки ефекту впливу на людей іонізуючого випромінювання.

Дозиметричний прилад – це прилад для оцінки іонізуючих випромінювань. Дозиметричний прилад забезпечує ведення радіаційної розвідки, дозиметричного контролю радіаційного опромінення людей, визначення радіоактивного забруднення навколишнього середовища.

Дозиметричні прилади за своїм призначенням поділяються на *чотири типи: індикатори, рентгенометри, радіометри, дозиметри* [14, 15].

Індикатори застосовують для виявлення радіоактивного забруднення місцевості та різних предметів. Деякі з них дають змогу також вимірювати рівні радіації β - і γ -випромінювань. Датчиком служать газорозрядні лічильники. До цієї групи приладів належать індикатори ДП-63, ДП-63А, ДП-64.

Рентгенометри призначені для вимірювання рівнів радіації на забрудненій радіоактивними речовинами місцевості. Датчиками в цих приладах застосовують іонізаційні камери або газорозрядні лічильники. Це загальноїсськовий рентгенметр ДП-2, рентгенметр «Кактус», ДП-3, ДП-3Б, ДП-5ВБ (А, Б, В) та ін.

Радіометри використовують для вимірювання ступеня забруднення поверхонь різних предметів радіоактивними речовинами. Датчиками радіометрів є газорозрядні і сцинтиляційні лічильники. Найбільш поширені прилади цієї групи ДП-12, бета-, гама-радіометр «Луч-А», радіометр «Тиса», радіометричні установки ДП-100М, ДП-100АДМ та ін.

Дозиметри призначені для вимірювання сумарних доз опромінення, одержаних особовим складом формувань ЦЗ та населенням, головним чином γ -опромінення. Вони поділяються за видом вимірюваних випромінювань γ -, β -частинок та нейтронного потоку. У дозиметрах індивідуального призначення датчиками служать іонізаційні камери, газорозрядні, сцинтиляційні та фотолічильники.

В основу роботи сучасних дозиметричних приладів покладені наступні методи: *фотографічний*,

хімічний, сцинтиляційний, іонізаційний. Фотографічний метод засновано на впливі іонізуючих випромінювань на світлочутливий шар фотоплівки, щільність потемніння якої пропорційна дозі опромінення. Хімічний метод ґрунтується на здатності іонізуючих випромінювань спричинювати хімічні зміни деяких речовин, що супроводжуються появою нового забарвлення розчину цих речовин. Сцинтиляційний метод використовує явище світіння (сцинтиляції) деяких речовин під впливом іонізуючих випромінювань. Кількість спалахів пропорційна інтенсивності випромінювання. Іонізаційний метод використовує явище іонізації атомів речовин під впливом іонізуючого випромінювання, внаслідок якого електрично нейтральні атоми розпадаються й утворюють іони. Якщо в опромінювану речовину помістити електроди і подати напругу постійного струму, то виникає іонний струм, сила якого пропорційна інтенсивності випромінювання. Цей метод використовують в усіх дозиметричних приладах.

Прилади радіаційної розвідки призначені для вимірювання потужності іонізуючих випромінювань та ступеня зараження місцевості та об'єктів радіоактивними ізотопами. До цієї групи приладів відносяться індикатори-сигналізатори, радіометри і рентгенометри: військового та промислового призначення ДП-5ВБ (А, Б, В), ДП-64, ДП-3Б, ІМД-21, СРП-68, СРП-88; побутові дозиметри: «Рось», РКС-104, ДРГ-01Т, Кадмій (ДКС-02К), ДСК-04 («Стриж»); радіометри: «Прип'ять», «Десна», «Бриз»; дозиметри-радіометри «Белла», «Стора-Т» (РКС-01), «Терра» (МКС-05), «Селвіс» (ДКС-ОЩ), «Пошук» (МКС-07), МКС-У та багато інших вітчизняного та закордонного виготовлення.

Прилади дозиметричного контролю (контролю опромінення) призначені для вимірювання доз опромінення людей, які знаходяться на забрудненій місцевості або під впливом проникаючої радіації, під час праці з радіоактивними речовинами. До цієї групи приладів відносять індивідуальні дозиметри: ДП-22В, ДП-24, ІД-1, ІД-11 та ряд універсальних сучасних приладів, які можливо використовувати в побутових умовах, типу «Стора-Т» (РКС-01), «Терра» (МКС-05), «Селвіс» (ДКС-01М).

Принципова схема будь-якого дозиметричного або радіометричного приладу однакова. Вона включає в себе три обов'язкових ланки: детекторний блок (детектор), реєструвальний пристрій (індикатор) і вузол живлення (акумулятори, батарейки, елементи живлення, тощо). Хоча сучасний прилад може мати багато додаткових блоків, пристроїв або систем (наприклад: підсилювачі, перетворювачі, стабілізатори, накопичувачі інформації). За конструктивними особливостями дозиметричні і радіометричні прилади поділяються на: порта-

тивні (кишенькові), переносні та стаціонарні. Ці прилади характеризуються певними технічними параметрами: чутливістю, часом розрізнення, відтворенням результатів вимірювань, температурою і механічною стійкістю. Чутливість приладу – величина нижньої межі випромінювання, яка стійко реєструється приладом. Час розрізнення – найменший час, за який два імпульси, що йдуть один за одним, реєструються окремо. Температурна стійкість – здатність приладу давати стійкі показання при різних температурах. Механічна стійкість приладу характеризує його здатність протистояти різним механічним впливам без зміни точності показань.

На сьогоднішній день на ринку України існує широкий вибір портативних дозиметричних та радіометричних приладів (таблиця 1).

На думку авторів статті на увагу заслуговують дві моделі: напівпрофесійний дозиметр METRINCO R600UA та професійний дозиметр-радіометр МКС-05 «Терра». Пропонуємо їх докладний опис.

METRINCO R600UA – портативний ЗВТ для оперативного контролю рентгенівського, гамма та бета-випромінювання [16]. Має високі метрологічні характеристики, може працювати як від батарейок, так і в стаціонарному режимі (через роз'єм USB-C). Здатен міряти накопичену дозу, оснащений звуковою сигналізацією порогу перевищення потужності або перевищення дози.

R-600UA оснащений енергокомпенсованим лічильником Гейгера-Мюллера, що має широкий діапазон та високу точність вимірювання. Зручне зчитування результатів вимірювання забезпечується 32-розрядним мікропроцесором, досить великим РК-дисплеєм з роздільною здатністю 64 x 128 та вбудованою сигналізацією з регулюванням порогів спрацювання.

У вбудованій пам'яті пристрою зберігаються дані про накопичене значення дози, поріг сигналізації потужності дози та порогове значення дози, які не будуть втрачені після вимкнення живлення. Прилад може працювати від 3 батарейок типу ААА або від вбудованого акумулятора, який можна заряджати через USB-роз'єм.

Вбудовані функції ЗВТ: індикація низького заряду акумулятора, звукова сигналізація при перевищенні допустимих меж вимірювання потужності випромінювання та значення дози, відображення кривої потужності дози в режимі реального часу, функція включення/вимкнення підсвічування РК-дисплею, вимірювання потужності дози в режимі реального часу, одночасний запис кумулятивної дози та перегляд дати початку вимірювання поточної сукупної дози.

№ з/п	Тип моделі та назва приладу	Виробник	Основні параметри
1	СТОРА-ТУ РКС-01 Дозиметр-радіометр	Ecotest, Україна	Тип детектора: лічильник Гейгера-Мюллера; тип випромінювання: гамма, бета; одиниці вимірювання: мкЗв/год, МеВ; діапазон потужності еквівалентної дози гамма-випромінювання: 0.1 ... 999.9 мкЗв/год
2	WALCOM FS2011 Дозиметр-радіометр	WALCOM, Китай	Тип детектора: лічильник Гейгера-Мюллера; тип випромінювання: гамма, бета, рентгенівське; одиниці вимірювання: мкЗв/год; діапазон потужності еквівал. дози гамма-випромінювання: 0.01 ~ 1000 мкЗв/год
3	РКС-01 СТОРА-АБГ Радіометр-дозиметр	Ecotest, Україна	Тип детектора: лічильник Гейгера-Мюллера; тип випромінювання: гамма, бета, рентгенівське, альфа; одиниці вимірювання: мкЗв/г, Рентген (Р), МеВ, Бк/см ² ; діапазон вимірів ПАЕД фотонного іонізуючого випромінювання: 0,1 ... 100 000 мкЗв/год
4	METRINCO R600UA Дозиметр	METRINCO Китай	Тип детектора: лічильник Гейгера-Мюллера; тип випромінювання: гамма, бета, рентгенівське; діапазон вимірювання: 0,1 мкЗв/год ~ 10 мЗв/год
5	МКС-05 «Терра» Дозиметр-радіометр	Ecotest, Україна	Тип детектора: лічильник Гейгера-Мюллера; тип випромінювання: гамма, бета, рентгенівське; діапазон вимірювання: 0,1...9 999 мкЗв/год



Рис. 3. Дозиметр METRINCO R600UA

в закладах охорони здоров'я, кабінетах променевої терапії, наукових лабораторіях, атомних електростанціях, для інспекції імпортованих та експортних товарів, для перевірки будівельних матеріалів, брухту чавуну та сталі, для промислового неруйнівного контролю іонізуючого випромінювання, радіаційних агентів отриманих особами під посиленням наглядом і захистом тощо.



Рис. 4 Дозиметр-радіометр МКС-05 Терра

рювальної техніки і може використовуватися в сфері законодавчо регульованої метрології.

Дозиметр METRINCO R600UA

(рис. 3) досить широко використовується для виявлення радіації в житлових приміщеннях та будинках, на підприємствах нафтохімічної промисловості, при геологічних дослідженнях,

Професійний дозиметр-радіометр МКС-05 Терра (рис. 4) (інша назва – Терра-О) – всесвітньо відомий продукт торгової марки ЕКО-ТЕСТ, який експортується у понад 70 країн [17]. Це професійний прилад для здійснення офіційних замірів, який вимірює рівень гамма-фону, бета-забруднення, накопичену дозу та час її накопичення. Оперативна оцінка гамма-фону здійснюється протягом 10 секунд. Даний дозиметр є засобом вимі-

Прилад призначений для вимірювання: потужності амбієнтного еквівалента дози гамма- та рентгенівського випромінювань; амбієнтного еквівалента дози гамма- та рентгенівського випромінювань; поверхневої густини потоку частинок бета-випромінювання; часу накопичення амбієнтного еквівалента дози; реального часу (годинник).

Переваги МКС-05 Терра: наявність п'яти незалежних вимірювальних каналів з почерговим виведенням інформації на один рідкокристалічний індикатор; автоматичне віднімання гамма-фону при вимірюванні бета-забрудненості; усереднення результатів вимірювань з можливістю ручного та автоматичного його переривання; автоматичний вибір інтервалів та діапазонів вимірювань; звукова сигналізація кожного зареєстрованого гамма-кванта чи бета-частинки з можливістю її відключення; двотональна звукова сигналізація перевищення запрограмованих порогових рівнів.

Прилад використовується: для дозиметричного і радіометричного контролю на підприємствах; для екологічних досліджень: контролю радіаційної чистоти житлових приміщень, будівель і споруд, прилеглих до них територій, предметів побуту, одягу, будматеріалів, поверхні ґрунту на присадибних ділянках та в домогосподарствах, транспортних засобів; як наочний засіб для учбових установ.

Фахівці Українського науково-дослідного інституту спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України протягом п'ятнадцяти років успішно використовують у роботі дозиметр-радіометр МКС-05 Терра.

Контроль стану чистоти повітря

Якість атмосферного повітря – надважливого природного ресурсу – впливає на природні еко-

системи, стан клімату і, через природні ланцюги, на всі компоненти довкілля.

В Україні за правове регулювання у сфері якості атмосферного повітря відповідають Закон України «Про охорону атмосферного повітря» від 16.10.1992 № 2707-ХІІ в редакції від 2001 р. та ще п'ять підзаконних актів.

Основною метою аналізу атмосферного повітря, є визначення його відповідності санітарно-гігієнічним нормам, зокрема порівнюють одержані результати аналізу з відповідними значеннями граничнодопустимих концентрацій (ГДК) для забруднюючих речовин [3].

При одночасній наявності у повітрі декількох забруднювальних речовин оцінку якості атмосферного повітря слід проводити з врахуванням характеру їх комплексної дії на організм людини. В окремих випадках, при одночасній присутності у повітрі кількох забруднювальних речовин, може спостерігатись явище потенціонування або синергетизму. Під потенціонуванням розуміють взаємне підсилення впливу двох або більшої кількості забруднювальних повітря речовин, при якому сумарний ефект їхньої шкідливої дії перевищує суму ефектів, що виникають при ізольованій дії кожного з цих забруднювальних повітря речовин. Величини ГДК забруднювальних повітря речовин періодично переглядаються з врахуванням нових даних про токсичність відомих речовин, а переліки поповнюються новими шкідливими речовинами.

Результатом порівняння фактичних та гранично допустимих концентрацій є значення кратності перевищення ГДК. Воно дає можливість оцінити рівень впливу окремих речовин на здоров'я людини. Однак, порівняння таких показників є не коректними, оскільки різні речовини мають різну шкідливість. Впоратися з цим обмеженням допомагає розрахунок *індексу якості повітря* (англ. *Air quality index, AQI*). ця аббревіатура використовується практично в усіх країнах для інформування громадськості про рівень забруднення повітря. Окрім порівняння фактичної концентрації до граничної, він враховує клас небезпечності. *Комплексний індекс якості повітря* дозволяє оцінити забруднення певного місця від різних речовин.

Спостереження за вмістом забруднюючих речовин у повітрі України є повноваженням Українського гідрометцентру, який є підрозділом Державної служби з надзвичайних ситуацій у складі Міністерства внутрішніх справ. Спостереження за концентраціями *пилу, діоксиду сірки, оксиду вуглецю, діоксиду азоту, свинцю та його неорганічних сполук, бенз(a)пірену, формальдегіду*

та радіоактивних речовин є обов'язковими. Інші речовини можуть бути включені до програми спостережень за рішенням органів місцевого самоврядування відповідно до специфіки екологічної ситуації.

Окрім того при певних умовах, також і в результаті бойових дій, можливе створення *вибухонебезпечного пилу та пожежонебезпечного пилу*, які несуть надзвичайну небезпеку [18]. Отже, потрібне вимірювання концентрації пилу в атмосферному повітрі в конкретних локаціях. Для таких вимірювань застосовують спеціалізовані прилади.

Прилади пилового контролю – пристрої і апарати, за допомогою яких визначається концентрація пилу в повітрі; поділяються на 2 класи: *прилади для відбору проб пилу і пиломіри*. *Пиломір* – прилад для визначення ступеня запиленості повітря безпосередньо на місці заміру (в шахтах, кар'єрах, системах вентиляції, на територіях виробничих об'єктів, тощо). Є пиломіри з фільтрувальним матеріалом, на якому осідають частинки пилу, і пиломіри без фільтрувального матеріалу, наприклад, оптичні (на сьогодні найпоширеніші). В останніх світло поглинається або розсіюється пилоповітряним потоком. За принципом дії пиломіри поділяються на оптичні, радіоізотопні, електрометричні та ін. *Експреспиломіри* – прилади для оперативного вимірювання концентрації пилу безпосередньо на місці (у гірничій виробці, цеху підприємства, конкретних місцевостях, тощо). Поділяються на оптичні, радіоізотопні, електронні та інші.

Таким чином, для контролю рівня забруднення повітря слід використовувати спеціальні аналізатори повітря, газоаналізатори, а також пробовідбірники твердих частинок. Такі ЗВТ з прямим зчитуванням надають інформацію під час відбору, що дозволяє швидко приймати рішення. Прилади прямого зчитування особливо корисні для виявлення точкових джерел забруднення або викидів. Щоб правильно вибрати й купити такий засіб вимірювальної техніки, слід враховувати основну його характеристику – діапазон аналізу.

Запиленість повітря можна визначити гравіметричним (ваговим), лічильним (мікроскопічним), фотометричним та деякими іншими методами. Видалення пилу з повітря може бути здійснено різними способами: аспіраційним, що ґрунтується на просмоктуванні повітря через фільтр; седиментаційним, що базується на процесі природнього осідання пилу на скляні пластинки або банки з подальшим підрахунком маси пилу, що осів на

їх поверхні; за допомогою електроосадження, принцип якого полягає в тому, що створюється електричне поле великої напруги, в якому пилові частинки електризуються і притягуються до електродів. Повна характеристика пилу складається з його маси, що міститься в одиниці об'єму повітря, хімічного та дисперсного складу.

На ринку України пропонується широкий вибір портативних приладів для контролю рівня забруднення повітря. На думку авторів найбільшу увагу заслуговують дві моделі: аналізатор запиленості повітря СЕМ DT-9880 та аналізатор якості повітря СЕМ DT-9881. Пропонуємо їх опис [8].



Рис. 5 Аналізатор запиленості повітря СЕМ DT-9880

Аналізатор запиленості повітря СЕМ DT-9880 (рис. 5) – шести-канальний ЗВТ з можливістю одночасного аналізу до шести різних розмірних діапазонів частинок. Прилад забезпечує отримання швидких і точних показань вмісту завислих твердих частинок, вимірює температуру і відносну вологість повітря, а також температуру точки роси.

Аналізатор запиленості повітря СЕМ DT-9880 являє собою екологічну міні-лабораторію, яка виконує широкий комплекс вимірювань.

Прилад дозволяє проводити вимірювання в промислових умовах, зручний для контролю якості повітря в приміщеннях різного призначення, для вимірювання концентрації пилу в атмосферному повітрі в конкретних локаціях. Має зручний для користувача великий 2,8-дюймовий кольоровий TFT LCD-екран, вбудовану пам'ять на 74 Мб та

можливість підключення MicroSD-карти (до 8 Гб) для зберігання фотографій (JPEG) і відеозаписів (3GP) з можливістю подальшого перегляду на персональному комп'ютері.

Аналізатор якості повітря СЕМ DT-9881

(рис. 6) – це міні-лабораторія екологічного контролю, яка може широко використовуватись в різноманітних галузях для визначення таких параметрів: вміст у повітрі дрібнодисперсних (0,3; 0,5; 1,0; 2,5; 5,0; 10 мкм) частинок (пилу); концентрація чадного газу і формальдегіду в навколишньому середовищі; температура повітря; відносна вологість повітря; температура точки роси.

Контроль стану чистоти зовнішнього повітря є важливою діяльністю, яку потрібно і доцільно проводити регулярно за допомогою портативних спеціалізованих ЗВТ, таких як СЕМ DT-9880 та (або) СЕМ DT-9881, щоб визначити рівні забруднення атмосферного повітря в локальному регіоні.

Висновки

Війна загострила екологічні проблеми в Україні. Після закінчення активної фази військового протистояння задачі їх вирішення будуть першочерговими. Для забезпечення експрес-контролю двох основних екологічних показників автори рекомендують використовувати комплект портативних приладів, що відображені в таблиці 2.

Такий мінімізований (по складу та вартості) набір портативних ЗВТ буде в нагоді багатьом фахівцям з екологічного контролю та екологічної безпеки.



Рис. 6 Аналізатор якості повітря СЕМ DT-9881

Таблиця 2

№ з/п	Тип моделі та назва приладу	Виробник	Призначеність
1	METRINCO R600UA Дозиметр	METRINCO, Китай	Контроль радіаційного стану довкілля
2	Інший варіант МКС-05 «Терра» Дозиметр-радіометр	«Спаринг-Віст Центр», Україна	
3	СЕМ DT-9880 Аналізатор запиленості повітря	СЕМ Instruments Китай	Контроль стану чистоти повітря
4	Інший варіант СЕМ DT-9881 Аналізатор якості повітря	СЕМ Instruments Китай	

Список літератури:

1. Адаменко О.М., Адаменко Я.О., Архипова Л.М. та ін. Екологічна безпека територій. Монографія. Івано-Франківськ, 2014. 456 с.
2. Адаменко О.М., Міщенко Л.В. Екологічний аудит територій. Підручник для екологічних спеціальностей вищих навчальних закладів. Івано-Франківськ, 2000. 342 с.

3. Хилько І.М. Екологічна безпека України: навчальний посібник. Київ, 2017. 267 с.
4. Яценко Л.Д. Екологічний складник національної безпеки: основні показники та способи їх досягнення. Київ, 2014. 52 с.
5. Трегубчук В.М. Ресурсно-екологічна безпека. URL: <http://old.niss.gov.ua/book/panorama/tregob.htm> (дата звернення: 10.03.2023).
6. Варганов А.З., Рубан А.Д., Шкуратник В.Л. Методы и приборы контроля окружающей среды и экологический мониторинг. Вологда, 2010. 640 с.
7. Озякова Е. Н. Техногенные системы и экологический риск: учебное пособие. Омск, 2015. 175 с.
8. Електронний ресурс фірми «7 вольт». URL: <https://www.simvolt.ua> (дата звернення: 10.03.2023).
9. Електронний ресурс компанії «Еталон-Прилад». URL: <https://etalonpribor.com.ua> (дата звернення: 10.03.2023).
10. Електронний ресурс приватного підприємства «БРОМ». URL: <https://brom.ua> (дата звернення: 10.03.2023).
11. Екологічне право України. Академічний курс / заг. ред. Ю.С. Шемшученка. Київ, 2008. 720 с.
12. Якунина И.В. Методы и приборы контроля окружающей среды. Экологический мониторинг. Тамбов, 2009. 188 с.
13. Чернявський І.Ю., Марущенко В.В., Мартинюк І.М. Військова дозиметрія, Київ, 2022, 530 с.
14. Електронний ресурс. URL: <http://slovoedia.org.ua> (дата звернення: 09.03.2023).
15. Касьянов М.А., Гуляев В.П., Друзь О.М., Коструб В.О. Прилади радіаційної, хімічної розвідки та дозиметричного контролю, газоаналізатори. Луганськ, 2006. 188 с.
16. Дозиметр R600UA. Інструкція з експлуатації. Електронний ресурс фірми «7 вольт». URL: <https://www.simvolt.ua> (дата звернення: 09.03.2023).
17. ДОЗИМЕТР-РАДІОМЕТР МКС-05 «ТЕРРА». Електронний ресурс фірми «7 вольт». URL: <https://www.simvolt.ua> (дата звернення: 08.03.2023).
18. Мала гірнича енциклопедія: в 3 т. / за ред. В.С. Білецького. Донецьк, 2007. Т. 2. 670 с.

Skakun O.V., Syvoborodko A.V. OVERVIEW OF PORTABLE MODERN MEASURING EQUIPMENT FOR ENVIRONMENTAL CONTROL

The article is devoted to an overview analysis of portable modern measuring equipment for environmental control.

The definition of such important concepts as ecocide, ecological control and ecological monitoring is given. Considered issues of environmental safety in Ukraine at the national and local levels. Potential directions and ways of development of environmental control in a civilized society are noted.

The classification of measuring equipment used or can be used for environmental control is given. Universal and specialized measuring equipment for environmental control are briefly described, prospects and trends of their development are determined. A review of scientific works and other information arrays on measuring equipment for environmental control was carried out.

The main research material in the proposed article is devoted to the analysis of portable modern measuring equipment for environmental control, which are produced by leading companies of the European Community, and developed Asian countries.

The features of modern measuring equipment for control are analyzed:

1) the radiation state of the environment;

2) the state of air cleanliness and the presence of various harmful components in it.

The article also lists brands (types) and parameters of portable measuring equipment, which the authors recommend to be used for environmental control.

Key words: *ecocide, environmental control, environmental monitoring, measuring equipment, classification of measuring equipment for environmental control, universal and specialized measuring equipment for environmental control, perspectives and trends in the development of measuring equipment for environmental control.*

РАДІОТЕХНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

УДК 621.396.96

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.2.1/09>

Воловик А.Ю.

Вінницький національний технічний університет

ЛОКАЛЬНО ОПТИМАЛЬНІ РОБАСТНІ ОЦІНКИ СТАНУ ЛІНІЙНИХ СИСТЕМ З НЕВИЗНАЧЕНИМИ ВХОДАМИ

У представленій роботі розглядається задача оцінки вектора стану лінійної дискретної системи в присутності неконтрольованих невизначених входів. Як правило, невизначені входи при моделюванні прийнято враховувати у вигляді випадкового процесу із заданою статистикою або представляти їх у якості постійних зсувів. Недоліком такого підходу є те, що будь-яке неадекватне припущення про їхню модель негативно позначається на якості роботи фільтра. Проте, існують фільтри з підвищеною стійкістю, які формують квазіоптимальні оцінки вектора стану системи незалежно від властивостей невизначених входів. Запропоновано новий метод побудови оцінок стану лінійної системи з змінними параметрами при наявності невизначених входів, що полягає у застосуванні двоетапної процедури розщеплення розширеного фільтра Калмана на два, вузькоспеціалізованих фільтра меншої розмірності, що працюють паралельно. Новизна методу полягає в розробці спрощеної структури двокаскадного фільтра Калмана, стійкого до впливу невизначених входів. Запропонований метод є альтернативою робастному фільтру Кітанідіса, але відрізняється простотою математичних розрахунків й відсутністю трудомістких процедур оптимізації за допомогою варіаційного обчислення, на зразок методу векторних множників Лагранжа із властивими йому обмеженнями. Практична цінність запропонованого методу синтезу робастного фільтра визначається можливістю його застосування у якості доповнення до стандартного фільтра Калмана, як засобу досягнення оптимальної якості процесу фільтрації для систем з невизначеними входами, тобто систем із частково відомою динамікою.

Ключові слова: невизначений вхід, декомпозиція, мінімальна узагальнена дисперсія, двох етапна апроксимація розширеного фільтра.

Вступ. Досить часто для практичних задач невизначеності нестационарних лінійних динамічних систем інтерпретуються, як невідомі збурення. У математичній моделі їх враховують уведенням додаткових неконтрольованих входів. У даній роботі розглядається задача оцінювання вектора стану лінійної нестационарної дискретної системи яка є інваріантною до неконтрольованих невизначених входів. У загальному випадку, невизначені входи прийнято подавати у вигляді стохастичного процесу із заданою статистикою [8] або розглядати їх як постійні зсуви [7]. Недоліком цього підходу є те, що у випадку відсутності апріорних даних про статистику невизначеного входу, будь-яке неадекватне припущення про їхню модель негативно позначається на якості роботи фільтра. Проте, відомі фільтри підвищеної надійності [1–5, 10, 11, 14], які дають оптимальні оцінки вектора стану системи відповідно до обраного критерію якості незалежно від властивостей невизначених входів. Зокрема, Кітанідіс [1]

при наявності невизначених входів запропонував фільтр Калмана, оптимальність якого досягалася шляхом мінімізації сліду коваріаційної матриці помилок фільтрації за рахунок уведення додаткових алгебраїчних обмежень. Дораух і Засадзинск [2] поширили результати роботи [1] на методи оцінки параметрів і отримали незміщені оцінки вектора стану з мінімальною дисперсією. Незважаючи на те, що їх метод є більш складним у порівнянні з методом Кітанідіса, їм вдалося виключити з розгляду трудомісткі методи оптимізації з використанням матричних функцій і множників Лагранжа. Келлер і ін. в [4] запропонували альтернативну й більш просту форму запису рівнянь параметричного оцінювання. В роботі [3] використовуючи, метод декомпозиції невизначених входів, у комбінації з інноваційним підходом, було отримано фільтр робастного типу. Форма представлення цього фільтра є найбільш загальною, оскільки складова з невизначеними входами присутня у рівняннях спостережень, а системні

шуми і шуми спостережень є статистично залежними. Делайон з співавторами [6] запропонували інший метод фільтрації при наявності невизначених входів, заснований на перетворенні вихідної системи в систему спеціального виду, з якої невизначений вхід був вилучений. На жаль, застосування цього методу обмежується системами, що мають тільки певні, позитивно визначені коваріаційні матриці. В представленій роботі пропонується метод синтезу робастного фільтра, який є нечутливим до впливів невизначених входів. Цей фільтр побудований на основі технології синтезу двох каскадного фільтра Калмана [9] і нового методу фільтрації невизначеного входу. В процесі синтезу, окремо доведена його еквівалентність фільтру Кітанідіса. На відміну від інших запропонованих методів є більш зручним для практичних додатків і вимагає тільки однієї двоетапної процедури ортогонального перетворення.

Потрібно додатково зауважити, що при деяких спрощених припущеннях щодо моделей невизначених входів, для обчислення їх перших двох моментів, можна використовувати методи адаптивної фільтрації в комбінації з методами ідентифікації параметрів [1]. У таких випадках, модель невизначеного входу стає доступною, а застосування розширеного фільтра Калмана може гарантувати менші значення коваріаційної матриці помилок фільтрації в порівнянні з фільтром робастного типу. Отже, для застосування методів адаптивної фільтрації пропонується нова, двоетапна процедура оцінювання стану системи з невизначеними входами. На першому етапі, при відсутності інформації щодо моделі невизначених входів, доцільно застосовувати робастний фільтр Калмана, що дає можливість отримати наближені оцінки вектору стану. У цей же час, із метою уточнення моделі невизначеного входу, використовується відповідна процедура ідентифікації. У випадку успішного її завершення замість робастного фільтра необхідно застосувати розширений фільтр Калмана, за допомогою якого, відбувається подальше уточнення оцінок вектора стану системи. Вочевидь, що для плавного перемикавання режимів «робастний – розширений», фільтри повинні мати співпадаючі обчислювальні структури, тому, під час синтезу в обох розглянутих фільтрах використовується двокаскадний еквівалент розширеного фільтра Калмана. Важливою перевагою отриманого робастного фільтра є можливість його легкого приведення до форми розширеного фільтра Калмана, що теж представлений у двокаскадному варіанті і є добре

відомим як оптимальний двокаскадний фільтр Калмана з мінімально можливими обчислювальними витратами [9]. Як підсумок – основним завданням майбутнього синтезу є отримання робастного фільтра Калмана у вигляді двох каскадної структури, що у подальшому називатиметься робастним двох каскадним фільтром Калмана. Структуру такого фільтру нескладно отримати на основі алгоритму оптимального двокаскадного фільтра Калмана в комбінації з рівняннями спостережень фільтра з невизначеними входами. Осатаній, в свою чергу, є еквівалентним фільтру Кітанідіса [1].

Структурно стаття складається з постановки завдання дослідження, побудови робастного фільтра Калмана, доведенні теореми про еквівалентність робастного фільтра й фільтра Кітанідіса, порівняння з раніше отриманими результатами, зокрема з результатами робіт [2, 6, 13] і підведення підсумків роботи.

Постановка задачі дослідження. Розглянемо лінійну дискретну систему стохастичного типу, у якій невідомі входи задаються у вигляді

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}(k+1, k)\mathbf{x}(k) + \mathbf{E}(k+1, k)\mathbf{d}(k) + \mathbf{w}(k); \quad (1)$$

$$\mathbf{y}(k) = \mathbf{H}(k)\mathbf{x}(k) + \eta(k), \quad (2)$$

де $\mathbf{x}(k) \in \mathcal{R}^n$ – вектор стану системи, $\mathbf{d}(k) \in \mathcal{R}^p$ – вектор невідомих входів, $\mathbf{y}(k) \in \mathcal{R}^m$ – вектор спостережень. Системні матриці $\mathbf{A}(k+1, k)$, $\mathbf{H}(k)$, $\mathbf{E}(k+1, k)$ відомі і мають відповідні розмірності, окрім того є справедливими припущення: $\text{rank}[\mathbf{E}(k+1, k)] = p$, $\text{rank}[\mathbf{H}(k)] = m (\geq p)$, $\text{rank}[\mathbf{H}(k)\mathbf{E}(k, k-1)] = p$. Дискретні шуми стану та спостережень $\eta(k)$ являють собою білі шумові послідовності з нульовими середніми значеннями, що мають задані коваріаційна матриці

$$E\{\mathbf{w}(k)\mathbf{w}^T(l)\} = \mathbf{Q}(k)\delta(k, l),$$

$$E\{\eta(k)\eta^T(l)\} = \mathbf{Q}(k)\delta(k, l), \quad E\{\mathbf{w}(k)\eta^T(l)\} = 0,$$

де T – символ транспонування, $\delta(k, l)$ – дельта функція Кронекера.

Загальний підхід до розв'язку поставленого завдання припускає, що компонента $\mathbf{d}(k)$ інтерпретується у вигляді стохастичного процесу,

$$\mathbf{d}(k+1) = \mathbf{d}(k) + \mathbf{w}_d(k), \quad (3)$$

де $\mathbf{w}_d(k)$ – біла шумова послідовність з нульовим середнім значенням і заданими коваріаційними матрицями:

$$E\{\mathbf{w}_d(k)\mathbf{w}_d^T(l)\} = \mathbf{Q}_d(k)\delta(k, l) \text{ та}$$

$$E\{\mathbf{w}(k)\mathbf{w}_d^T(l)\} = \mathbf{Q}_{xd}(k)\delta(k, l).$$

Якщо ввести розширений вектор стану, що складається з $\mathbf{x}(k)$ й $\mathbf{d}(k)$ та використати алгоритм

розширеного фільтра Калмана, то стає можливим одержувати оцінки стану оптимального типу. Однак, з ростом розмірності розширеного вектора стану радикально зростають обчислювальні витрати й помилки обчислень. Отже, розширений фільтр Калмана буде важко реалізованим на практиці. У цьому випадку більш доцільним буде варіант використання оптимального двокаскадного фільтра Калмана, який полягає їх двох допоміжних фільтрів, один з яких являє собою модифікований фільтр вільний від впливу зсувів, а інший спеціально орієнтований на їхнє оцінювання. У сукупності ці два фільтри є еквівалентними розширеному фільтру Калмана, розглянутому в роботі [8]. Основний недолік цього підходу полягає в тому, що оптимальність цього фільтра досягається за рахунок вибору компромісних співвідношень між коваріаційними матрицями \mathbf{Q}_d і \mathbf{Q}_{xd} [1].

Альтернативний метод одержання фільтра інваріантного до впливів невизначених входів полягає в застосуванні принципу декомпозиції. Кітанідісом був запропонований метод синтезу робастного лінійного фільтра, який забезпечує незміщеність отриманих оцінок у комбінації з мінімальним значенням узагальненої дисперсії й у той же час є нечутливим до впливів з боку невизначених входів. У цьому випадку оптимальні оцінки формується з наступних співвідношень [1]:

$$\bar{\mathbf{x}}(k) = \bar{\mathbf{x}}(k-1) + \mathbf{L}(k) [\mathbf{y}(k) - \mathbf{H}(k) \bar{\mathbf{x}}(k-1)]; \quad (4)$$

$$\mathbf{L}(k) = \mathbf{K}(k) + [\mathbf{I} - \mathbf{K}(k) \mathbf{H}(k)] \mathbf{E}(k, k-1) \times$$

$$\times \{ \mathbf{E}^T(k, k-1) \mathbf{H}^T(k) \mathbf{C}^{-1}(k) \mathbf{H}(k) \mathbf{E}(k, k-1) \}^{-1}; \quad (5)$$

$$\mathbf{P}_x(k) = [\mathbf{I} - \mathbf{L}(k) \mathbf{H}(k)] \mathbf{P}_x(k-1) [\mathbf{I} - \mathbf{L}(k) \mathbf{H}(k)]^T + \mathbf{L}(k) \mathbf{R}(k) \mathbf{L}^T(k)$$

де $\bar{\mathbf{x}}(k-1) = \mathbf{A}(k, k-1) \bar{\mathbf{x}}(k-1); \quad (7)$

$$\mathbf{P}_x(k-1) = \mathbf{A}(k, k-1) \mathbf{P}_x(k-1) \mathbf{A}^T(k, k-1) + \mathbf{Q}(k-1); \quad (8)$$

$$\mathbf{K}(k) = \mathbf{P}_x(k-1) \mathbf{H}^T(k) \mathbf{C}^{-1}(k); \quad (9)$$

$$\mathbf{C}(k) = \mathbf{H}(k) \mathbf{P}_x(k-1) \mathbf{H}^T(k) + \mathbf{R}(k). \quad (10)$$

З [1] відомо, що фільтр який формує незміщені оцінки з мінімальною дисперсією не є глобально оптимальним у змісті мінімуму середньоквадратичної похибки оцінювання, за винятком особливого випадку, коли інформація про властивості вектора збурювання є повністю відсутньою, тобто вектор $\mathbf{d}(k)$ є довільною функцією часу. У зв'язку із цим, робастний фільтр має головну перевагу – інваріантність показників якості роботи до вектора невизначених входів. Ця якість є особливо важливою у випадку,

коли статистичні властивості вектора $\mathbf{d}(k)$ суттєво не Гаусові або інформація про них зовсім відсутня. Метою подальших розрахунків є отримання еквівалентного перетворення фільтра Кітанідіса (4)–(10) у форму двох каскадного фільтра Калмана.

Робастний двокаскадний фільтр Калмана.

Основа синтезу робастного фільтра Калмана з характеристиками якості інваріантними до невизначеного входу, полягає в модифікації фільтра, який спеціально орієнтований на оцінювання зсувів. Крім того модифікації також підлягає його вагова матриця $\mathbf{U}(k)$. Нижче, у якості довідки, приводиться перелік операторів оптимального двокаскадного фільтра Калмана [8], отриманого при розширенні вектора стану в системі рівнянь (1)–(3):

$$\hat{\mathbf{x}}(k) = \mathbf{x}^*(k) + \mathbf{V}(k) \mathbf{d}^*(k); \quad (11)$$

$$\mathbf{P}_x(k) = \mathbf{P}_{x^*}(k) + \mathbf{V}(k) \mathbf{P}_d(k) \mathbf{V}^T(k), \quad (12)$$

де $\mathbf{x}^*(k)$ – оцінка стану першого розщепленого фільтра:

$$\mathbf{x}^*(k-1) = \mathbf{A}(k, k-1) \mathbf{x}^*(k-1) + \bar{\mathbf{u}}(k-1); \quad (13)$$

$$\mathbf{x}^*(k) = \mathbf{x}^*(k-1) + \mathbf{K}_{x^*}(k) [\mathbf{y}(k) - \mathbf{H}(k) \mathbf{x}^*(k-1)]; \quad (14)$$

$$\mathbf{P}_{x^*}(k-1) = \mathbf{A}(k, k-1) \mathbf{P}_{x^*}(k-1) \mathbf{A}^T(k, k-1) + \bar{\mathbf{Q}}(k-1); \quad (15)$$

$$\mathbf{K}_{x^*}(k) = \mathbf{P}_{x^*}(k-1) \mathbf{H}^T(k) [\mathbf{H}(k) \mathbf{P}_{x^*}(k-1) \mathbf{H}^T(k) + \mathbf{R}(k)]^{-1}; \quad (16)$$

$$\mathbf{P}_x(k) = [\mathbf{I} - \mathbf{K}_{x^*}(k) \mathbf{H}(k)] \mathbf{P}_{x^*}(k-1); \quad (17)$$

$\mathbf{d}^*(k)$ – оцінка входу другого розщепленого фільтра:

$$\mathbf{d}^*(k-1) = \mathbf{d}^*(k-1); \quad (18)$$

$$\mathbf{d}^*(k) = \mathbf{d}^*(k-1) + \mathbf{K}_{d^*}(k) [\mathbf{y}(k) - \mathbf{H}(k) \mathbf{x}^*(k-1) - \mathbf{S}(k) \mathbf{d}^*(k-1)]; \quad (19)$$

$$\mathbf{P}_{d^*}(k-1) = \mathbf{P}_{d^*}(k-1) + \mathbf{Q}_{d^*}(k-1); \quad (20)$$

$$\mathbf{K}_{d^*}(k) = \mathbf{P}_{d^*}(k-1) \mathbf{S}^T(k) \left[\mathbf{H}(k) \mathbf{P}_{x^*}(k-1) \mathbf{H}^T(k) + \mathbf{R}(k) + \mathbf{S}(k) \mathbf{P}_{d^*}(k-1) \mathbf{S}^T(k) \right]^{-1}; \quad (21)$$

$$\mathbf{P}_{d^*}(k) = [\mathbf{I} - \mathbf{K}_{d^*}(k) \mathbf{S}(k)] \mathbf{P}_{d^*}(k-1); \quad (22)$$

Матриці корекції:

$$\bar{\mathbf{u}}(k) = [\bar{\mathbf{U}}(k+1) - \mathbf{U}(k+1)] \mathbf{d}^*(k); \quad (23)$$

$$\bar{\mathbf{Q}}(k) = \mathbf{Q}(k) - \mathbf{Q}_{xd}(k) \bar{\mathbf{U}}^T(k+1) - \mathbf{U}(k+1) [\mathbf{Q}_{xd}(k) - \bar{\mathbf{U}}(k+1) \mathbf{Q}_d(k)]^T; \quad (24)$$

$$\bar{\mathbf{U}}(k) = \mathbf{A}(k, k-1) \mathbf{V}(k-1) + \mathbf{E}(k, k-1); \quad (25)$$

$$\mathbf{S}(k) = \mathbf{H}(k) \mathbf{U}(k), \quad (26)$$

де $\mathbf{U}(k)$ і $\mathbf{V}(k)$ – двох шагові вагові матриці, що визначаються рівняннями

$$\mathbf{U}(k) = \bar{\mathbf{U}}(k) + [\mathbf{Q}_{xd}(k-1) - \bar{\mathbf{U}}(k) \mathbf{Q}_d(k-1)] [\mathbf{P}_{d^*}(k-1)]^{-1}; \quad (27)$$

$$\mathbf{V}(k) = \mathbf{U}(k) - \mathbf{K}_{x^*}(k) \mathbf{S}(k). \quad (28)$$

З (18)–(22) видно, що $\mathbf{d}^*(k)$ являє собою оцінку невизначеного входу у сенсі мінімуму середньоквадратичної похибки за умови існування коварі-

аційних матриць $\mathbf{Q}_d(k)$ і $\mathbf{Q}_{xd}(k)$. Однак, якщо ці статистичні дані невідомі або маловірогідні, то фільтр не в змозі формувати оптимальну оцінку стану. Для подолання даного ускладнення використовуємо наступний підхід.

Як відомо, роботу оптимального фільтра Калмана можна характеризувати за допомогою двох, взаємно суперечливих складових. З однієї сторони процес відновлення характеризується складовою, яка обумовлена впливом рівняння динаміки об'єкта, і є причиною появи динамічних помилок. З другої, причиною появи додаткових помилок статистичного характеру є математична модель каналу спостережень. Матриця передачі фільтра Калмана зважає ці складові таким чином, що результуюча помилка фільтрації стає мінімально можливою, тобто реалізує найкращий компромісний баланс між ними. Коли модель невизначеного входу (3) є не коректною або маловірогідною, складові, що задаються рівняннями (18) і (20) не викликають довіри. Отже, їх бажано виключити з подальшого розгляду, тобто модифікувати математичну модель каналу спостережень (19)–(22) з метою виключення значень $\mathbf{d}^*(k/k-1)$ і $\mathbf{P}_{d^*}(k/k-1)$. Це можна здійснити шляхом підстановки (18) в (19) з наступною комбінацією рівнянь (21) і (22). Результатом цих перетворень є модифікована складова рівняння спостережень, яка ухвалює наступний вид:

$$\mathbf{d}^*(k/k) = [\mathbf{I} - \mathbf{K}_{d^*}(k)\mathbf{H}(k)\mathbf{U}(k)]\mathbf{d}^*(k/k-1) + \mathbf{K}_{d^*}(k)[\mathbf{y}(k) - \mathbf{H}(k)\mathbf{x}^*(k/k-1)]; \quad (29)$$

$$\mathbf{K}_{d^*}(k) = \mathbf{P}_{d^*}(k)\mathbf{U}^T(k)\mathbf{H}^T(k)[\mathbf{H}(k)\mathbf{P}_{d^*}(k)\mathbf{H}^T(k) + \mathbf{R}(k)]^{-1}. \quad (30)$$

Слід підкреслити, що нове рівняння для каналу спостережень повністю визначається тільки після того, як будуть знайдені матриці $\mathbf{U}(k)$ й $\mathbf{P}_{d^*}(k/k)$.

Спочатку, розглянемо коваріаційну матрицю помилок оцінювання невизначеного входу. Для того, щоб забезпечити незалежність оцінюючого невизначеного входу фільтра від базової моделі, пропонується вибирати матрицю передачі цього фільтра так, щоб виконувалося обмеження:

$$\mathbf{I} - \mathbf{K}_{d^*}(k)\mathbf{H}(k)\mathbf{U}(k) = 0. \quad (31)$$

В цьому випадку вираз (29) прийме вигляд

$$\mathbf{d}^*(k/k) = \mathbf{K}_{d^*}(k)[\mathbf{y}(k) - \mathbf{H}(k)\mathbf{x}^*(k/k-1)]. \quad (32)$$

В подальшому підставимо (30) у (31) вирішавши рівняння відносно $\mathbf{P}_{d^*}(k/k)$, получимо

$$\mathbf{P}_{d^*}(k/k) = [\mathbf{U}^T(k)\mathbf{H}^T(k)\mathbf{C}^{-1}(k)\mathbf{H}(k)\mathbf{U}(k)]^{-1}, \quad (33)$$

де

$$\mathbf{C}(k) = \mathbf{H}(k)\mathbf{P}_{x^*}(k/k-1)\mathbf{H}^T(k) + \mathbf{R}(k). \quad (34)$$

Потім розглянемо, як слід вибирати вагову матрицю $\mathbf{U}(k)$. Виходячи з чисто евристичних міркувань вирази (13) і (15) перепишемо у вигляді

$$\mathbf{x}^*(k/k-1) = \mathbf{A}(k, k-1)\hat{\mathbf{x}}(k-1/k-1) + [\cdot]_1, \quad (35)$$

$$\mathbf{P}_{x^*}(k/k-1) = \mathbf{A}(k, k-1)\mathbf{P}_x(k-1/k-1)\mathbf{A}^T(k, k-1) + \mathbf{Q}(k-1) + [\cdot]_2, \quad (36)$$

де $\hat{\mathbf{x}}(k/k)$ і $\mathbf{P}_x(k/k)$ визначаються формулами (11) та (12), відповідно, а

$$[\cdot]_1 = [\mathbf{E}(k, k-1) - \mathbf{U}(k)]\mathbf{d}^*(k-1/k-1), \quad (37)$$

$$[\cdot]_2 = [\mathbf{E}(k, k-1) - \mathbf{U}(k)]\mathbf{P}_{d^*}(k-1/k-1)[\mathbf{E}(k, k-1) - \mathbf{U}(k)]^T - \mathbf{U}(k)[\mathbf{Q}_{xd}(k-1)]^T - \mathbf{Q}_{xd}(k-1)\mathbf{U}^T(k) + \mathbf{U}(k)\mathbf{Q}_d(k-1)\mathbf{U}^T(k). \quad (38)$$

З метою збереження стійкості (35) і (36) стосовно базової моделі невизначеного входу (3) є за доцільним вибрати:

$$[\cdot]_1 = 0, \quad [\cdot]_2 = 0. \quad (39)$$

Таким чином, значення $\mathbf{U}(k)$ дорівнює:

$$\mathbf{U}(k) = \mathbf{E}(k, k-1). \quad (40)$$

Отримані результати дозволяють визначити робастний двокаскадний фільтр Калмана, у якому виключений вплив моделі невизначеного входу. Для цього слід підставити (35), (36), (32), (30) і (33) в (13) і (12), що в підсумку дає наступні співвідношення:

$$\hat{\mathbf{x}}(k/k) = \mathbf{x}^*(k/k) + \mathbf{V}(k)\mathbf{d}^*(k/k); \quad (41)$$

$$\mathbf{P}_x(k/k) = \mathbf{P}_{x^*}(k/k) + \mathbf{V}(k)\mathbf{P}_{d^*}(k/k)\mathbf{V}^T(k), \quad (42)$$

де $\mathbf{x}^*(k/k)$ визначається рівняннями:

$$\mathbf{x}^*(k/k-1) = \mathbf{A}(k, k-1)\hat{\mathbf{x}}(k-1/k-1); \quad (43)$$

$$\mathbf{x}^*(k/k) = \mathbf{x}^*(k/k-1) + \mathbf{K}_{x^*}(k)[\mathbf{y}(k) - \mathbf{H}(k)\mathbf{x}^*(k/k-1)]; \quad (44)$$

$$\mathbf{P}_{x^*}(k/k-1) = \mathbf{A}(k, k-1)\mathbf{P}_x(k-1/k-1)\mathbf{A}^T(k, k-1) + \mathbf{Q}(k-1); \quad (45)$$

$$\mathbf{K}_{x^*}(k) = \mathbf{P}_{x^*}(k/k-1)\mathbf{H}^T(k)\mathbf{C}^{-1}(k); \quad (46)$$

$$\mathbf{P}_{x^*}(k/k) = [\mathbf{I} - \mathbf{K}_{x^*}(k)\mathbf{H}(k)]\mathbf{P}_{x^*}(k/k-1), \quad (47)$$

$\mathbf{d}^*(k/k)$ визначається рівняннями:

$$\mathbf{d}^*(k/k) = \mathbf{K}_{d^*}(k)[\mathbf{y}(k) - \mathbf{H}(k)\mathbf{x}^*(k/k-1)]; \quad (48)$$

$$\mathbf{K}_{d^*}(k) = \mathbf{P}_{d^*}(k/k)\mathbf{E}(k, k-1)\mathbf{H}^T(k)\mathbf{C}^{-1}(k); \quad (49)$$

$$\mathbf{P}_{d^*}(k/k) = [\mathbf{E}^T(k, k-1)\mathbf{H}^T(k)\mathbf{C}^{-1}(k)\mathbf{H}(k)\mathbf{E}(k, k-1)]^{-1}, \quad (50)$$

а $\mathbf{V}(k)$ і $\mathbf{C}(k)$ відповідно дорівнюють:

$$\mathbf{V}(k) = [\mathbf{I} - \mathbf{K}_{x^*}(k)\mathbf{H}(k)]\mathbf{E}(k, k-1); \quad (51)$$

$$\mathbf{C}(k) = \mathbf{H}(k)\mathbf{P}_{x^*}(k/k-1)\mathbf{H}^T(k) + \mathbf{R}(k). \quad (52)$$

Запропонований робастний фільтр є еквівалентом фільтру Кітанідіса, представленого рівняннями (4)–(6). Доказ цього положення впливає з нижче наведеної теореми.

Теорема: Якщо ранг добутку $\text{rank}[\mathbf{H}(k)\mathbf{E}(k, k-1)] = \text{rank}[\mathbf{E}(k, k-1)] = p$, то робастний двокаскадний фільтр Калмана (41)–(52) є еквівалентним фільтру Кітанідіса (4)–(10).

Доказ: Для доказу необхідно отримати такі попередні співвідношення:

1. З (40) та (33) можливо одержати

$$\mathbf{U}(k)\mathbf{P}_{d^*}(k/k)\mathbf{U}^T(k) = \mathbf{E}(k, k-1) \left[\begin{array}{c} \mathbf{E}^T(k, k-1) \\ \mathbf{H}^T(k)\mathbf{C}^{-1}(k)\mathbf{H}(k)\mathbf{E}(k, k-1) \end{array} \right]^{-1} \mathbf{E}^T(k, k-1). \quad (53)$$

2. З (5) та (10) відповідно

$$\mathbf{P}_x(k) = [\mathbf{I} - \mathbf{L}(k)\mathbf{H}(k)]\mathbf{P}_x(k-1) + [\mathbf{L}(k) - \mathbf{P}_x(k-1)\mathbf{H}^T(k)\mathbf{C}^{-1}(k)]\mathbf{C}(k)\mathbf{L}^T(k). \quad (54)$$

3. З (30), (53) та (34)

$$\mathbf{u}(k)\mathbf{K}_{d^*}(k) = \mathbf{E}(k, k-1) \left[\frac{\mathbf{E}^T(k, k-1)\mathbf{H}^T(k)\mathbf{C}^{-1}(k)}{\mathbf{H}(k)\mathbf{E}(k, k-1)} \right] \mathbf{E}^T(k, k-1)\mathbf{H}^T(k)\mathbf{C}^{-1}(k). \quad (55)$$

4. А з (30), (40) і (33) одержуємо

$$\mathbf{K}_{d^*}(k)\mathbf{C}(k)\mathbf{K}_{d^*}^T(k) = \mathbf{P}_{d^*}(k/k), \quad \mathbf{K}_{d^*}(k)\mathbf{C}(k)\mathbf{K}_{d^*}^T(k) = \mathbf{P}_{d^*}(k/k). \quad (56)$$

5. Шляхом підстановки (41) і (42) у (35) і (36) можливо отримати

$$\mathbf{x}^*(k/k-1) = \mathbf{A}(k, k-1)\hat{\mathbf{x}}(k-1/k-1), \quad (57)$$

$$\mathbf{P}_{x^*}(k/k-1) = \mathbf{A}(k, k-1)\mathbf{P}_x(k-1/k-1)\mathbf{A}^T(k, k-1) + \mathbf{Q}(k-1). \quad (58)$$

Далі, попередньо припустимо, що у момент часу k оцінки фільтра Кітанідіса, а також їх коваріаційна матриця співпадають з відповідними показниками двох каскадного фільтра Калмана, тобто

$$\bar{\mathbf{x}}(k/k) = \hat{\mathbf{x}}(k/k), \quad \mathbf{P}_x(k/k) = \mathbf{P}_x(k/k). \quad (59)$$

Застосовуючи (8) та (58) можливо встановити, що

$$\mathbf{P}_x(k+1/k) = \mathbf{P}_{x^*}(k+1/k). \quad (60)$$

Використовуючи вираз (6), (10), (16), (55) і (60) отримаємо

$$\mathbf{L}(k+1) = \mathbf{K}_{x^*}(k+1) + [\mathbf{I} - \mathbf{K}_{x^*}(k+1)\mathbf{H}(k+1)]\mathbf{U}(k+1)\mathbf{K}_{d^*}(k+1). \quad (61)$$

Підставивши (61) у (4) та використовуючи (59), (57), (14), (51), і (32) можливо отримати

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{x}}(k+1/k+1) &= \mathbf{x}^*(k+1/k) + \mathbf{K}_{x^*}(k+1)[\mathbf{y}(k+1) - \mathbf{H}(k+1)\mathbf{x}^*(k+1/k)] + \\ &+ [\mathbf{I} - \mathbf{K}_{x^*}(k+1)\mathbf{H}(k+1)]\mathbf{U}(k+1)\mathbf{K}_{d^*}(k+1) \times \\ &\times [\mathbf{y}(k+1) - \mathbf{H}(k+1)\mathbf{x}^*(k+1/k)] = \mathbf{x}^*(k+1/k+1) + \mathbf{V}(k+1)\mathbf{d}^*(k+1/k+1). \end{aligned} \quad (62)$$

Підставимо (10), (16) і (60) у (54) знаходимо:

$$\mathbf{P}_x(k+1/k+1) = [\mathbf{I} - \mathbf{L}(k+1)\mathbf{H}(k+1)]\mathbf{P}_{x^*}(k+1/k) + [\mathbf{L}(k+1) - \mathbf{K}_{x^*}(k+1)\mathbf{C}(k+1)]\mathbf{L}^T(k+1) \quad (63)$$

А підставляючи (61) у (63) і використовуючи (16), (17), (51) і (56) отримаємо

$$\mathbf{P}_x(k+1/k+1) = [\mathbf{I} - \mathbf{K}_{x^*}(k+1)\mathbf{H}(k+1)] \times$$

$$\left\{ \begin{aligned} & \left[\mathbf{P}_{x^*}(k+1/k) + \mathbf{U}(k+1)\mathbf{K}_{d^*}(k+1)\mathbf{C}(k+1) \times \right. \\ & \left. \times [(\mathbf{I} - \mathbf{K}_{x^*}(k+1)\mathbf{H}(k+1))\mathbf{U}(k+1)\mathbf{K}_{d^*}(k+1)]^T \right] \Big\} = \\ & = \mathbf{P}_{x^*}(k+1/k+1) + \mathbf{V}(k+1)\mathbf{K}_{d^*}(k+1)\mathbf{C}(k+1)\mathbf{K}_{d^*}^T(k+1)\mathbf{V}^T(k+1) = \\ & = \mathbf{P}_{x^*}(k+1/k+1) + \mathbf{V}(k+1)\mathbf{P}_{d^*}(k+1/k+1)\mathbf{V}^T(k+1). \end{aligned} \quad (64)$$

Порівнюючи (62) і (64) з виразами (41) і (42), відповідно можна побачити, що вони містять (59) у момент часу $k+1$.

Важливою перевагою отриманого фільтра, який забезпечує незміщеність оцінок з мінімальною дисперсією шляхом застосування двоетапної технології, є гарантування показників, заявлених у роботі [1] без застосування обмежень властивих методу Лагранжа. Крім того, за допомогою запропонованого робастного фільтра каскадного типу можна встановити безпосередній зв'язок з розширеним фільтром Калмана, який гарантує глобальну оптимальність розв'язку завдання, пов'язаного з одержанням оцінок стану лінійної системи при наявності невизначених входів.

Висновки. У роботі представлений альтернативний варіант фільтра Кітанідіса, який формує незміщені оцінки вектора стану з мінімальною дисперсією для лінійної дискретної системи при наявності невизначених входів. Синтез запропонованого робастного фільтра заснований на застосуванні технології локально оптимальної апроксимації розширеного фільтра Калмана паралельно діючою двокаскадною розщепленою структурою, і на відміну від відомих робіт не містить трудомістких процедур оптимізації типу векторних множників Лагранжа й супутніх йому обмежень. Запропонований робастний фільтр можна використовувати в якості доповнення до стандартного фільтра Калмана в якості засобу досягнення оптимальної якості фільтрації для систем з невизначеними входами, тобто систем із частково відомою динамікою.

Список літератури:

1. Kitanidis, P. K. Unbiased minimum-variance linear state estimation, *Automatica*, vol. 23, pp. 775–778, 1987.
2. Darouach M., Zasadzinsk M. Unbiased minimum variance estimation for systems with unknown exogenous inputs, *Automatica*, vol.33, pp. 717–719, 1997.
3. Hou M., Patton R. J. Optimal filtering for systems with unknown inputs. *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 43, pp. 445–449, 1998.
4. Keller J. Y., Darouach M., Caramelle L. Kalman filter with unknown inputs and ro-bust two-stage filter, *Int. J. Syst. Sci.*, vol. 29, pp. 41–47, 1998.
5. Volovyk A., Kychak V., Osadchuk A., Zhurakovskiy B. Fault Identification in Linear Dynamic Systems by the Method of Locally Optimal Separate Estimation. *Emerging Networking in the Digital Transformation Age. TCSET 2022. Lecture Notes in Electrical Engineering*, vol 965. Springer, Cham.
6. Delyon B., Zang Q. On the optimality of the Kitanidis filter for state estimation re-jecting unknown inputs. // *Automatica* 132, October 2021.
7. Sun J., Zhou J., Gu X. Variational Bayesian Two-Stage Kalman Filter for Systems with Unknown Inputs. *Procedia Engineering* 29(2012), 2265–2273.

8. Kong H., Shan M., Sukkarieh S., Chen T., Zheng X. Kalman filtering under un-known inputs and norm constraints. // Automatica, Volume 133, November 2021, 109871. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2021.109871>
9. Hsieh C. S. , Chen F. C. Optimal solution of the two-stage Kalman estimator, IEEE Trans. Automat. Contr., vol. 44, pp. 194–199, 1999.
10. Hua J., Wang N., Zhao K. Simultaneous Unknown Input and State Estimation for the Linear System with a Rank-Deficient Distribution Matrix. Mathematical Problems in Engineering 2021(12):1-11.
11. Zhu H., Zhang G., Li Y., Lung H. A novel robust Kalman filter with unknown non-stationary heavy-tailed noise. Automatica, Volume 127, May 2021, 109511, <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2021.109511>
12. Friedland B. Treatment of bias in recursive filtering, IEEE Trans. Automat. Contr., vol. 14, pp. 359–367, 1969.
13. Alouani A. T., Rice T. R., Blair W. D. A two-stage filter for state estimation in the presence of dynamical stochastic bias, in Proc. Amer. Contr. Conf., Chicago, IL, 1992, pp. 1784–1788.
14. Volovyk A., Kychak V., Havrilov D. Discrete Kalman Filter Invariant to Perturbations. Acta Polytechnica Hungarica, Vol. 18, No. 10, 2021, pp. 21–41.

Volovyk A. Yu. LOCALLY OPTIMAL ROBUST ESTIMATES OF THE LINEAR SYSTEMS STATE WITH INDEFINITE INPUTS

Quite often, for practical problems, the system uncertainties of non-stationary linear dynamic systems are interpreted as unknown disturbance. In the mathematical model, they are taken into account by introducing additional uncontrolled inputs. In the presented work, the problem of linear discrete system state vector estimating in the presence of uncontrolled uncertain inputs is considered. As a rule, it is customary to take into account uncertain inputs in modeling as a random process with given statistics or to represent them as constant shifts. The disadvantage of this approach is that any inadequate assumption about their model negatively affects the quality of the filter. In theory, there are also filters of increased stability to the uncertain inputs influences, which form quasi-optimal estimates of the system state vector, regardless of the properties of the uncertain inputs themselves. A new method for constructing estimates of the time-varying linear system state in the presence of uncertain inputs is proposed, which is based on the use of a two-stage technology for splitting the extended Kalman filter into two, working in parallel, highly specialized filters of smaller dimension. The novelty of the method lies in the development of a simplified structure of a two-stage Kalman filter resistant to the uncertain inputs influence. The proposed method is an alternative to the Kitanidis robust filter and is distinguished by the simplicity of mathematical derivation and the absence of time-consuming optimization procedures using variational calculation, like the Lagrange vector multiplier method with its inherent limitations. The practical value of the proposed robust filter synthesis method is determined by the possibility of its application as a supplement to the standard Kalman filter as a means of achieving the filtering process optimal quality for uncertain inputs systems, in other words, systems with partially known dynamics.

Key words: uncertain input, decomposition, two-stage approximation of the extended Kalman filter, robust filtering.

Загребя А.Я.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Лебедев Д.Ю.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

РОЗРОБКА СХЕМОТЕХНІЧНОГО РІШЕННЯ ЦИФРОВОГО МЕТЕО-ХРОНОМЕТРА

Темою даної роботи є створення цифрового хронометра з додатковим функціоналом та підключенням до комп'ютера. Звичайний годинник, як відомо, є пристроєм, який вказує актуальний час, дозволяючи людям планувати свій день і здійснювати різні дії відповідно до точного часу. Проте, одним з головних недоліків багатьох готових виробів є їх залежність від живлення. Якщо живлення втрачається, годинник втрачає змогу показувати актуальний час, і при відновленні живлення необхідно знову налаштовувати його. Це може бути надзвичайно незручно, адже для цього необхідний інший годинник або пристрій з доступом до Інтернету.

У даній роботі було прийнято рішення зв'язати годинник зі службою точного часу в автоматичному режимі, щоб уникнути цих недоліків. Завдяки цьому цифровий хронометр зможе сам встановити актуальний час при відновленні живлення і не буде потребувати налаштування.

Додатково, була додана функція емуляції натискання «Ctrl+S» для автоматичного збереження даних на персональному комп'ютері, що дуже корисно, особливо коли електроенергія непередбачувано вимикається та зникає живлення комп'ютера.

Проект містить блоки розширення функціоналу, зокрема підключення барометру BMP280, налаштування роботи емуляції клавіатури кнопками та енкодером на самому годиннику, автоматична зміна яскравості дисплею в залежності від освітлення у приміщенні, режим сну для збільшення часу життя батареї та інші можливості.

Не використана у проекті шина SPI контролера STM32 була виведена на додатковий роз'єм, що дає можливість у майбутньому підключати додаткові модулі до годинника, і навіть реалізувати розумний дім. В якому головним пристроєм (хабом) буде саме цей годинник.

Дана стаття присвячена опису електричної схеми годинника.

Ключові слова: годинник, цифровий хронометр, збереження часу, розумний дім, хронометр, STM32.

Постановка проблеми. Через війну в Україні часто стало зникати електропостачання у житлових будинках, а великий попит на джерела безперебійного, або резервного живлення призвели до того що не всі можуть їх придбати.

У сучасному світі майже кожен працює за комп'ютером (далі ПК) та непередбачувані відключення електропостачання призводять до втрати даних та як наслідок, багатьох годин роботи людини. Крім того, через необхідність зменшення навантаження на мережу доводиться вимикати системи енергозабезпечення.

Постає необхідність в автоматизованій системі контролю часу, яка б не залежала від не запланованих відключень електромережі.

Постановка завдання. Для вирішення цих проблем було прийнято рішення розробити цифровий хронометр, який міг би заряджатися від

ПК коли є живлення та допомагати орієнтуватися у часі коли живлення відсутнє. Крім того, при підключенні до комп'ютера цифровий засіб повинен з заданою періодичністю емулювати натискання комбінації «Ctrl+S» для збереження відкритого файлу, що має значно зменшити втрати при раптовому вимиканні світла.

Також для контролю за температурою у приміщенні буде використовуватись барометр BMP280, який дозволить досить точно вимірювати температуру оточуючого середовища та атмосферний тиск.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Найближчі аналоги даного годинника – це Losso GT та DS-3625L.

Порівняння між цифровим метео-хронометром та дзеркальними настільними годинниками Losso GT та DS-3625L можна провести за допомогою декількох параметрів.

По-перше, годинник на STM32 [1, 2] має вбудовану синхронізацію через інтернет, що дозволяє точно синхронізувати час зі світовими стандартами. У порівнянні з цим, дзеркальні настільні годинники Losso GT [3] та DS-3625L [4] мають менш точну синхронізацію, оскільки їх часові механізми базуються на механічних елементах, які з часом вносять похибку.

По-друге, годинник на STM32 має вбудований термометр і барометр, що дозволяє вимірювати температуру та атмосферний тиск. Ці параметри можуть бути корисними для тих, хто цікавиться метеорологією, або для тих, хто працює в спеціалізованих умовах (наприклад, у медичній лабораторії). Дзеркальний настільний годинник Losso GT має лише термометр, а DS-3625L немає вбудованого термометра та барометра.

По-третє, усі годинники мають можливість увімкнути будильники. Losso GT – підтримує до двох будильників, на DS-3625L можна увімкнути лише один будильник, а цифровий хронограф підтримує до 13.

Отже, годинник на STM32 має ряд переваг над дзеркальними настільними годинниками Losso GT та DS-3625L, зокрема, більш точну синхронізацію, вбудований термометр та барометр, функцію збереження даних на ПК. Ці переваги можуть вплинути на вибір користувачив на користь даного годинника.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Вибір мікроконтролера

Для реалізації даного проекту було обрано контролери двох серій – STM32F407 та STM32F103.

STM32F407 було обрано з міркувань його поширеності, доступності на ринку та низької вартості. Крім того, він встановлений на платі GlobalLogic, яка використовувалася для початкової відладки прототипу.

STM32F103, не дивлячись на те, що цей мікроконтролер вже знятий з виробництва, все ще зберігається на складах та доступний для придбання. Ця серія контролерів також відома своєю низькою вартістю, доступністю та легкістю використання. Тому він був використаний для годинника, зібраного на друкованій платі.

Обидва контролери підтримують USB HID (Human Interface Device) протокол, UART та I2C шини, а також мають достатню кількість GPIO виводів для реалізації всіх необхідних функцій.

Вибір дисплею

Для виведення інформації в годиннику було використано два типи дисплеїв: 1602 та

LCD12864B (рис. 1). У першій версії годинника було обрано дисплей типу 1602, оскільки його функціонал був достатнім, і він вже був встановлений на платі GlobalLogic, яка була використана для початкової відладки цього прототипу годинника.

Для другої версії годинника було обрано дисплей типу LCD12864B. Цей дисплей має той самий інтерфейс обміну даними, що й 1602, проте він є більшим і має достатньо місця для виведення великого, зручного циферблата та додаткової інформації, такої як атмосферний тиск, температура, стан Wi-Fi та затримка емуляції «Ctrl+S». Однак, на друкованій платі закладено перемички для встановлення дисплею типу 1602, що дозволяє використовувати його у випадку, якщо дисплей типу LCD12864B недоступний.

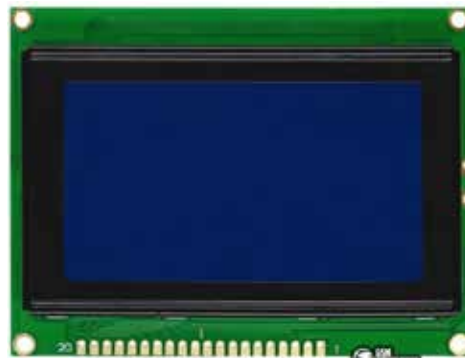


Рис. 1. Дисплей LCD12864B

Вибір контролерів DC-DC перетворювачів

Для успішної роботи мікроконтролера STM32 необхідно забезпечити стабільне живлення з напругою 3,3 В, в той час як дисплей типу 1602 вимагає живлення з напругою 5 В. Оскільки передбачається використання живлення від батареї, необхідно забезпечити зниження напруги до 3,3 В та її підвищення до 5 В.

Для реалізації понижуючого перетворення було використано компактний та економічний контролер понижуючого DC-DC інвертора ST13470.

У свою чергу, для забезпечення підвищення напруги до 5 В було обрано контролер підвищуючого DC-DC інвертора MT3608. Віддаючи перевагу цій мікросхемі, автор проекту керувався її широким поширенням на ринку та власним досвідом роботи з цими контролерами.

Підключення дисплея

Для підключення дисплея до контролера використовується 4-провідний протокол, але у схемі передбачено декілька перемичок, що забезпечують сумісність з дисплеями 1602 та LCD12864B. Схема підключення зображена на рис. 2.

1602/LCD12864B

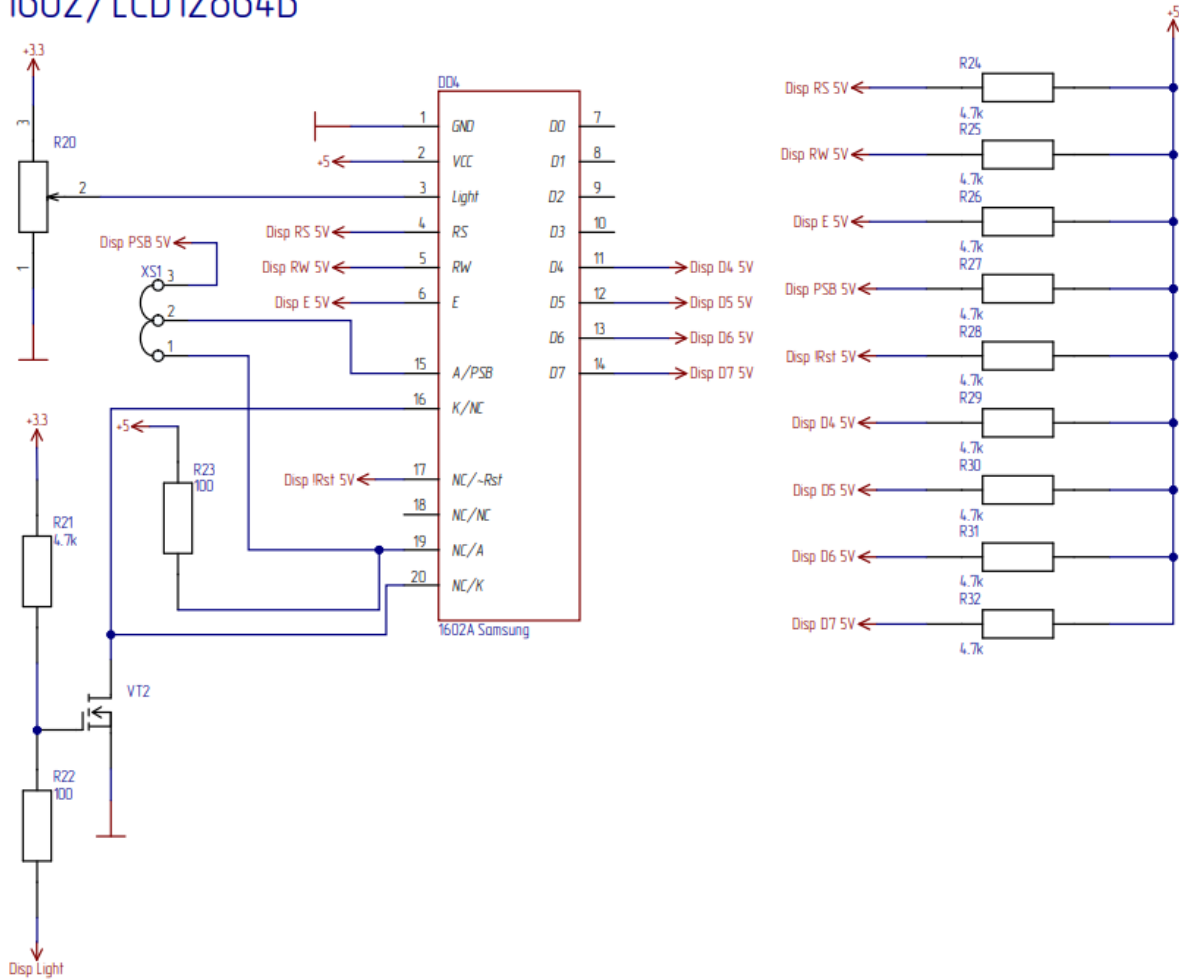


Рис. 2. Схема підключення дисплея

На схемі видно наявність транзистора, що відповідає за керування підсвіткою дисплея. Крім того, передбачено використання резисторів для забезпечення узгодження логічних рівнів, оскільки дисплей розраховано на напругу 5 В, тоді як STM32 може видавати тільки 3,3 В. Завдяки використанню open-drain режиму GPIO та підтягуванню напруги до 5 В через резистори, можна організувати логіку з напругою 5 В.

Підключення ESP8266

На рисунку 3 зображена схема підключення ESP8266 до STM32. Вхід Enable та RST було підключено до STM32 з метою забезпечення повного контролю над ESP8266 зі сторони керуючого контролера. Таке підключення дозволяє здійснювати включення/виключення модуля ESP8266, а також перезавантаження у випадку, коли модуль заблокується. Крім того, таке підключення дозволяє забезпечити гладке включення модуля при старті годинника, що забезпечує стабільну роботу всієї системи.

ESP8266

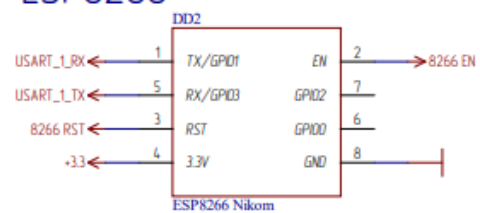


Рис. 3. Схема підключення ESP8266

Підключення BMP280

На рисунку 4 наведено схему підключення BMP280. За допомогою перемички XS2 можна обрати адресу по якій можна буде зв'язатися з BMP280 по шині I2C. Якщо перемичка буде замкнена на землю адреса буде 1110110b, якщо на 3,3 В – адреса буде 1110111b.

Можливість вибору адреси дозволяє підключити додатковий пристрій по шині I2C і не викликати конфліктів пристроїв.

Конденсатори C10 та C11 додано для зменшення пульсацій живлення та більш стабільної роботи мікросхеми.

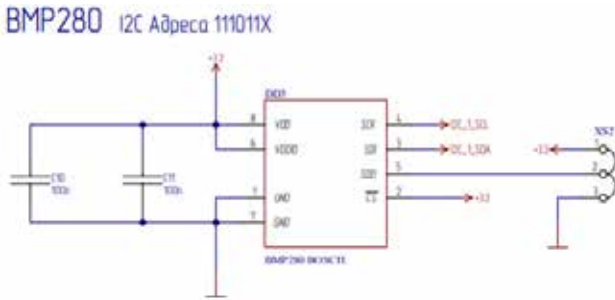


Рис. 4. Схема підключення BMP280

Підключення енкодера та кнопок

На рисунку 5 наведено схему підключення енкодера та кнопок керування. Енкодер, який використовується для керування пристроєм, зазвичай має два вихідних канали з фазовим зсувом на 90 градусів між ними, що дає змогу визначати напрямок обертання та кількість обертів. Кожен канал підключено до відповідного входу мікроконтролера STM32. Крім того, до мікроконтролера підключено дві кнопки керування, з «підтяжкою» до 3,3 В та конденсаторами для зменшення ефекту брязкоту контактів кнопок.

На рисунку 6 наведено схему підключення кнопки перезавантаження STM32. Резистор потрібен для «підтяжки» до 3,3 В, щоб коли кнопка не натиснута була логічна 1, а коли натиснута, вона замикає лінію на землю, тобто логічний 0.

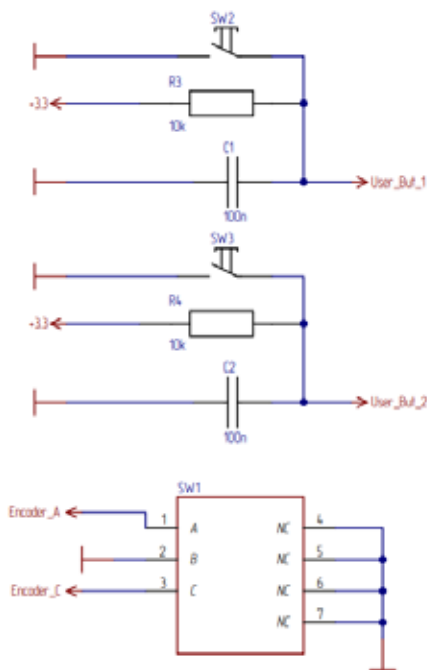


Рис. 5. Схема підключення енкодера та кнопок

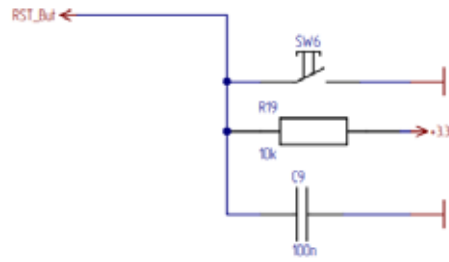


Рис. 6. Схема підключення кнопки перезавантаження

За допомогою мосфет-транзистора VT1 зумер може бути включено або виключено. Для забезпечення більш надійної роботи мосфет-транзистора VT1 використовується резистор R12, який розряджає затвор мосфет-транзистора та допомагає забезпечити надійне «запирання».

Представлена на рисунку 7 схема підключення STM32 є ключовим компонентом системи управління. У ній наведені назви всіх ліній, які підключаються до мікроконтролера.

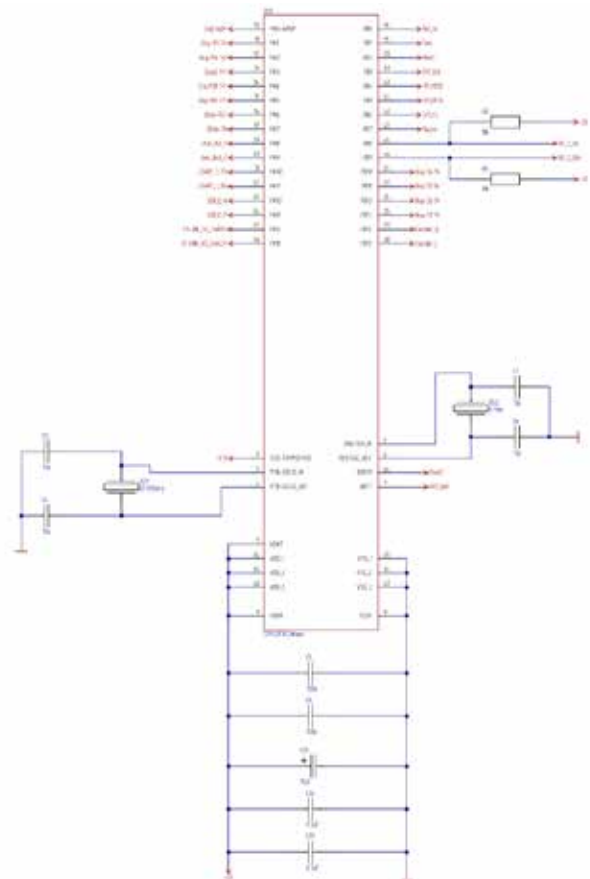


Рис. 7. Схема підключення STM32

На схемі підключені два кварцевих резонатора, один для системи тактування мікроконтролера, а інший – для стабілізації швидкості обміну даними по шині USB.

Висновки. У даній роботі ми представили годинник з розширеним функціоналом, що включає автоматичну синхронізацію часу з Інтернетом, підключенням до ПК, функцію емуляції натискання клавіш для автоматичного збереження даних на ПК, а також відображення температури з атмосферним тиском. Наша електрична схема була розроблена і протестована, щоб забезпечити надійну роботу годинника.

Проект містить плани на подальше розширення функціоналу, такі як налаштування роботи емуляції клавіатури кнопками та енкодером на самому годиннику, управління через команди чат-

боту для подальшої обробки, що може відбуватися за допомогою кодування даних [5], автоматична зміна яскравості дисплею в залежності від освітлення у приміщенні, режим сну для збільшення часу життя батареї та синхронізація з системою контролю енергоспоживання від відновлювальних джерел енергії [6].

Проект також має потенціал для розширення через додатковий роз'єм SPI контролера STM32, який дає можливість підключати додаткові модулі до годинника. Ми сподіваємося, що наша робота буде корисною для дослідників інженерної галузі, які працюють над розробкою подібних проектів.

Список літератури:

1. RM0008 Reference manual. URL: https://www.st.com/resource/en/reference_manual/cd00171190-stm32f101xx-stm32f102xx-stm32f103xx-stm32f105xx-and-stm32f107xx-advanced-arm-based-32-bit-mcus-stmicroelectronics.pdf.
2. PM0056 Programming manual. URL: https://www.st.com/resource/en/programming_manual/pm0056-stm32f10xxx20xxx21xxx11xxxx-cortexm3-programming-manual-stmicroelectronics.pdf.
3. Зеркальний годинник Lasso GT. URL: https://losso.com.ua/p1340890996-tsifrovye-chasy-nastolnye.html?source=merchant_center&gclid=Cj0KCQjwtsCgBhDEARIsAE7RYh2avZqmTRQN1QDlwx8Ubh3MruoMcZyplWGdgyd0DLz0R8TDFS8YgGoaAp7CEALw_wcB.
4. Зеркальний годинник BS- 3625L. URL: <https://bt.rozetka.com.ua/327717373/p327717373/characteristics/>.
5. Шаповал І.В., Лебедев Д.Ю. Алгоритм роботи пристрою AES шифратора. *Проблеми інформатизації та управління*. Київ, 2016. № 1(53). С. 87–91.
6. Бодак Є.Є., Лебедев Д.Ю. Розробка системи контролю енергоспоживання для відновлюваних джерел енергії. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського, Серія: Технічні науки*. 2022. Том 33 (72). № 4. С. 21–26. DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.4/05>

Zahreba A.Ya., Lebedev D.Yu. DEVELOPMENT OF THE CIRCUIT ENGINEERING SOLUTION FOR A DIGITAL WEATHER CHRONOMETER

The topic of this work is the creation of a clock with additional functionality. A traditional clock is a device that displays the current time, allowing people to plan their day and perform various actions according to the hours and minutes.

However, one of the main disadvantages of many ready-made products is their dependence on power supply. If the power is lost, the clock loses the ability to count time, and when power is restored, it needs to be reconfigured. This can be extremely inconvenient, as it requires another clock or device with internet access.

In this work, the decision was made to connect the clock to the internet to avoid these drawbacks. This way, the clock can automatically retrieve the correct time upon power restoration and will not require any inconvenient configuration.

Additionally, a function was added to emulate the «Ctrl+S» keypress for automatic data saving on a personal computer, which is very useful, especially when the power unexpectedly goes out and disconnects the computer's power supply.

The project includes plans to expand the functionality, including connecting the BMP280, setting up keyboard emulation using buttons and an encoder on the clock itself, automatic display brightness adjustment depending on the room's lighting, sleep mode to extend battery life, and other possibilities.

The unused SPI bus of the STM32 controller was output to an additional connector, providing the ability to connect additional modules to the clock in the future and even implement a smart home, with the clock serving as the main device.

This article is dedicated to describing the electrical circuit of the clock.

Key words: clock, information storage, smart home, autonomous devices, STM32.

UDC 621.372.544

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.2.1/11>**Manko O.O.**

Kyiv Professional College of Communication

Kunah N.I.

Kyiv Professional College of Communication

Kharlai L.O.

Kyiv Professional College of Communication

Nikiforenko K.B.

Kyiv Professional College of Communication

Konovalov O.Yu.

Kyiv Professional College of Communication

Sotnichenko Yu.O.

Kyiv Professional College of Communication

PROTECTION OF INPUT CIRCUITS OF MICROWAVE RANGE RADIO RELAY STATIONS RECEIVERS AGAINST POWERFUL IMPULSE INTERFERENCES

The principle of construction of wide-band self-controlled power limiters mm – wavelength range is proposed in the work. The operating range is considered, which includes the range of frequencies that lie between 28 GHz and 38 GHz, and which are used by 5G technology. As a basis for the constructive design of the limiter, a guide system of the H-waveguide type was chosen.

Its structural parameters have been optimized. In particular, the width of the waveguide crest and the distance between the crests are selected. It was determined that the width of the ridges and the distance between them significantly affect the parameters of the input losses in the mode of a small and large input signal. In particular, reducing the width of the ridges increases the introduced loss in the mode of a large input signal, which is a positive factor. It was determined that a similar course of the dependence of losses occurs when the distance between the ridges decreases. However, in this case there is a slight increase in losses in the small signal mode. Thus, there is an optimal ratio in relation to these dimensions that is determined in the work.

Methods for calculating the transmission characteristics (introduced attenuation) of self-controlled power limiters in the small-signal mode are provided. Ways to optimize the design of the limiter are considered. The value of the spatial interval was selected for the placement of the semiconductor elements included in the design of the limiter in the guide system of the H-waveguide. The proposed interval provides a wide operating frequency range in the low signal mode, which includes the frequencies of the 5G mobile communication technology. A similar construction of the limiter can be used in the 60 GHz frequency range, which is also used by 5G technology.

At the same time, the losses of the experimental sample in the mode of low power of the input signal at the lower frequencies of the operating range did not exceed 0.3 dB. At the upper frequencies of the operating range, losses did not exceed 1.7 dB. The transmission characteristic in the range was quite smooth. In the mode of pulsed high input power, the value of losses was of the order of 30 dB. At the same time, the signal duty cycle was in the range of 10-100.

The results of this work can significantly increase the reliability of the input circuits of microwave receivers of mm-band radio relay stations operating in a complex electromagnetic environment, namely in the presence of the influence of strong external pulse signals. Along with this, they can be used to improve the reliability of mobile networks of the new generation using 5G technology.

Key words: *guide system, losses in the mode of a low-power signal, losses in the mode of a high-power signal, diodes with a Schottky barrier, p-i-n-diodes.*

Formulation of the problem. At the current stage of communications development, intensive research is being conducted on the implementation of communication networks using the millimeter wavelength range. At the same time, the development of the millimeter wavelength range continues, using frequencies of 28 GHz, 38 GHz [1] and 60 GHz [2], which belong to the wavelength range of 5G technologies.

Given the high information throughput capacity of such networks, it is important to ensure a high level of their reliability by increasing their protection against powerful interference. One of the most important parameters of transceivers of communication networks is their immunity. Because impulse interference of significant power can damage the input circuits of receiving devices, in particular, lead to breakdown or increase the noise level of mixing diodes.

Thus, the problem of protecting the input circuits of receiving devices in the millimetres wavelength range, including radio relay stations, from powerful external interference is urgent.

Analysis of modern developments regarding protection devices for the input circuits of microwave receivers. The solution to this problem significantly increases the reliability of the equipment. Protective devices of microwave receivers prevent energy overload of their input circuits, ensuring reliable operation of elements sensitive to it – tunnel, parametric, detector and mixing diodes and microwave transistors [3]. These elements are widely used in the input circuits of microwave receivers of the millimeter range radio-relay stations and other radio-electronic devices of similar purpose. The listed elements are characterized by low levels of permissible microwave power, which are primarily related to the so-called burn-in power [4].

Thus, taking into account the practically unforeseen possibility of irradiating the microwave receiver with a high-power pulse, the problem arises of building an effective fast-acting and wide-band protective device, the function of which is to limit the microwave power falling on sensitive elements. From a functional point of view, the maximum permissible input power $P_{in\ max}$ is determined by the level of the maximum permissible power entering the output $P_{out\ max}$ (the typical value of $P_{out\ max}$ for mixers, parametric and transistor low-noise amplifiers is within 10–200 mW). However, of course, the limit of $R_{in\ max}$ is dictated by the dissipation of part of the input power in the working volume of the limiter itself. The heat dissipating ability of the semiconductor structure of the limiters, like most solid-state microwave devices, is small and rarely exceeds 1 W in continuous mode. Therefore, with an average input power of tens of watts and, even more so, several

kilowatts, they tend to create highly reflective limiters, the input impedance of which in the mode of high power level is much smaller than the characteristic resistance of the transmission line Z_0 [5].

A typical solid-state protective device is a microwave module, in general n-cascade, and each cascade can be an autonomous protective device. P-i-n-diode structures are mainly used as elements that provide a high level of attenuation of a powerful input signal [6].

If synchronous and non-synchronous (random) interference of high power is received at the input of the receiver, an element sensitive to microwave power must be used as a sensor in the design of the device. The signal from the sensor is fed to the amplifier, and from the output of the amplifier – to p-i-n-diode structures. Such devices are called active, because they need to be connected to a power source for their operation. For all the advantages, active designs have a significant drawback. In the event of a power failure (in the event of an accident, planned shutdown, etc.), the receiver elements (input circuits, mixer) remain practically defenceless against high-power microwave signals, since tunnel, parametric, detector and mixing diodes and microwave transistors are sensitive to them even in a "cold" state.

It is desirable that the work of the limiter is carried out automatically and does not require external control signals to be applied to it. In this regard, so-called passive designs are more promising devices. Passive semiconductor protective devices are power limiters in which due to the automatic shift of the operating point during the rectification of incoming microwave oscillations and a sharp decrease in the resistance of the semiconductor structure, a state of high conductivity is formed in the plane of the inclusion of the diode and the incident power is intensively reflected in the direction of the source, which leads to output power level limitation.

The use of semiconductor limiting diodes made it possible to dramatically reduce the overall dimensions and mass of limiting devices [7]. The purpose of limiting diodes can be explained using the example of the simplest receiver of microwave signals with a protective limiting device (Fig. 1). Waveguide B connects antenna A to the input of amplifier E.

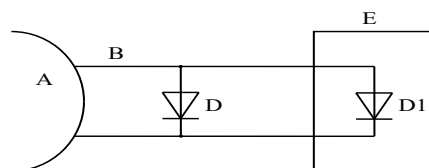


Fig. 1. Scheme of inclusion of a limiting diode to protect the receiver

The detector diode D1 is turned on at the input of the amplifier. A limiting diode D is included in the waveguide between the antenna and D1. When a weak signal arrives from the antenna, it passes through the waveguide with the limiting diode almost without attenuation. When the power of the microwave signal increases to a certain value, the attenuation will increase and part of the incident power will be reflected. The greater the incident power, the greater its part will be reflected. The reason for this microwave power limiting effect is the change in the total input resistance of the limiting diode under the action of the rectified current. A change in the total input resistance leads to a change in the transfer losses of the limiting device. This happens due to the fact that the limiting diode is, as it were, a combination of a p-i-n diode and a diode with a p-n junction. The scheme of its structure is the same as that of switching p-i-n diodes [4]. If it is necessary to reduce the limiting power threshold, instead of a limiting diode, a diode with a Schottky barrier (SBD) is used [8].

The disadvantage of circuits of protective devices (PD) on one limiting diode is a relatively low level of introduced losses (which depends on the direct current through the diode). In this regard, a rather promising schematic solution is the use of auxiliary rectifier diodes, the rectified current of which controls p-i-n diodes and limiting diodes (Fig. 2). Such a scheme is self-controlled and therefore has high reliability, in contrast to an active controlled scheme that requires synchronization signals and supply voltage [7].

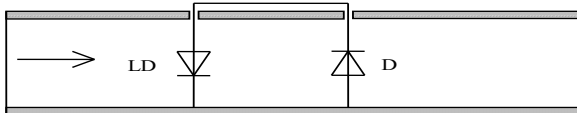


Fig. 2. Scheme of passive PD:
LD-limiting diode;
D-rectifier diode.

In this scheme, the increase in direct current is achieved by sequentially including the detector diode on the BSD in the PD. In the process of detecting the incident microwave signal, the BSD creates a rectified voltage on its contacts. This voltage plays the role of a direct bias for the limiting diode and reduces the threshold power and the limiting power, because it reduces the resistance of the diode. The use of an auxiliary diode facilitates the development of solid-state ZP, but also creates new problems. The parameters of the rectifier diode play an important role, determining the inertia of such a ZP and increasing the peak of the leakage power.

Setting objectives. Taking into account the above, it is possible to formulate general requirements, compliance with which ensures a high level of development for the protective device:

1. The protective device must be "passive", i.e. do not use an external power source and operate due to the incoming microwave signal.

2. The protective device must have a small maximum tripping power and a high switching speed (low inertia).

3. The protective device should introduce small losses in the transmission mode (ideally, they are equal to zero) and high losses in the input power limiting mode.

4. The protective device must be sufficiently broadband and resistant to high levels of microwave power.

Among the disadvantages of PD currently used is a relatively narrow operating frequency range (up to 10%), which is explained by the use of resonant elements in them. In addition, there are practically no developments of PD in mm – the range of wavelengths, although the development of this range in the direction of the application of transmission systems using 5G technology in it continues.

Thus, there are problems of creating protective devices that would meet as many of the listed requirements as possible and master new frequency ranges

Selection of the type of guide system and the principles of schematic construction of the protective device. The decisive parameter when choosing a protective device construction scheme is the operating frequency range, which in our case is determined by 5G technology and covers the entire operating range of a rectangular waveguide with a section of 7.2x3.4 mm. In such a wide frequency band, integrated gratings and other devices using impedance transformers based on transmission line segments [5] cannot be used in the PD, since these elements provide acceptable characteristics in a relatively narrow frequency band (about 5–10%).

It is obvious that the required width of the operating band of the PD can be ensured by its implementation on the basis of a regular transmission line without the use of matching resonant elements. The principle of a self-controlled microwave power limiter was used as a circuit diagram, when the energy of the detected microwave signal is used to power the control p-i-n diodes (Fig. 3). The advantages of such a schematic solution were clarified above. In this case, the PD is always in the working mode, even if the equipment is disconnected from the power source [7].

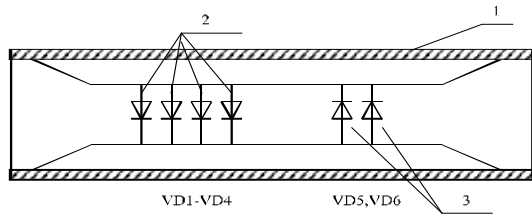


Fig. 3. PD based on a regular transmission line (H-waveguide)
 1 – H-waveguide;
 2 – control node on p-i-n diodes;
 3 – node of detector diodes (BSD).

Losses (signal attenuation) in these schemes in the weak signal mode are determined both by losses in the active elements and by the reflection of the signal from the input of the PD due to the mismatch of the transmission line at the locations of the diodes, which occurs even in the absence of losses in the diodes. If capacitance C is included in a certain cross-section of a coordinated long line with a wave resistance ρ (Fig. 4), the reflection coefficient from this cross-section is determined by the expression:

$$r = \frac{1}{-1 + i \cdot \frac{2}{\omega \rho C}}, \quad (1)$$

where $\omega = 2\pi f$ – is the circular frequency, i – is an imaginary unit.

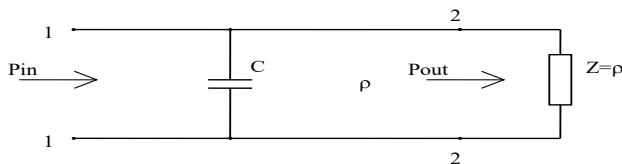


Fig. 4. Scheme of inclusion of capacitive heterogeneity in a regular transmission line

From (1), it is possible to calculate the value of the transmission coefficient of the line between sections 1-1 and 2-2 (Fig. 4):

$$\frac{P_{in}}{P_{out}} = \frac{1}{1 + \frac{1}{4} \cdot \omega^2 \cdot \rho^2 \cdot C^2}, \quad (2)$$

and, accordingly, losses in the line:

$$L = 10 \lg \left(1 + \frac{1}{4} \cdot \omega^2 \cdot \rho^2 \cdot C^2 \right). \quad (3)$$

In fig. 5 shows the dependence of losses (due to reflection) on the section of the line with capacitance C and wave resistance ρ depending on the value of C (ρ expressed in ohms, C in picofarads). It follows from the figure that to ensure losses of the order of 1 dB, it is necessary to fulfill the condition $\rho C \leq 5 \Omega \text{hm} \times \text{pF}$. Capacities of p-i-n diodes used in the millimeter range usually have a value of 0.05–0.1 pF [4]

and cannot be reduced both for technological reasons and in view of the thermal regime, which determines the limit value of the microwave power that is switched. It follows from this that to create a PD with low attenuation in the weak signal mode, it is necessary to use a line with a wave resistance not higher than 50–100 Ohms.

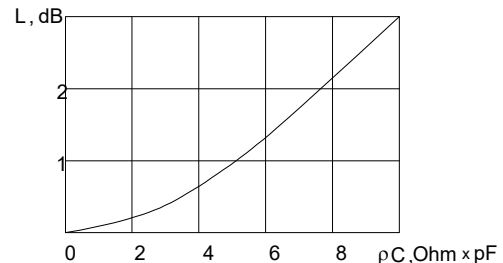


Fig. 5. Dependence of losses due to reflection on the section of a regular line with wave resistance ρ on the capacity C included in the line (ρ is expressed in ohms, C – in picofarads)

It is obvious that an ordinary rectangular waveguide is not very suitable for this purpose, since its wave resistance has a higher value. In addition, the electromagnetic wave field in it is distributed over almost the entire cross-section, while the active elements (AE) placed in the rectangular waveguide can be considered as point elements with concentrated parameters. The level of AE interaction with the electromagnetic wave in this case is quite low.

In connection with the above, the following types of lines can be considered the most acceptable for the implementation of the PD, from the point of view of ensuring sufficient heat dissipation:

1. H-waveguide, where you can mount AE on the crest of the waveguide, which will provide the necessary heat dissipation.

2. MSL – microstrip line. If holes are made in the dielectric plate at the locations of the AE, the diodes can be mounted directly on the metal plate, which will perform the functions of a heat sink.

However, MSLs have relatively high losses, and making holes in the dielectric plate is a relatively complex technological operation. Thus, the entire set of requirements for the guide system is provided by the H-waveguide.

Evaluation of parameters and calculation of characteristics of individual elements of the protective device. In order to estimate the main parameters of the PD and calculate the characteristics of its elements, it is first necessary to determine the characteristics of the regular waveguide structure and its geometric dimensions.

In fig. 6 shows the design of the H-shaped waveguide. The waveguide is formed by two symmetrically located ridges of width $2t$, the distance between them is $2l$. These ridges are located in a rectangular waveguide, the width of which is 7.2 mm and the height is 3.4 mm.

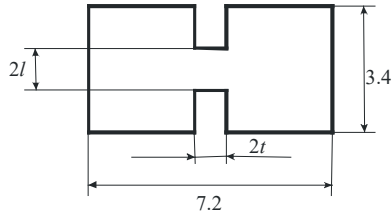


Fig. 6. Design of H-waveguide

From the results of the calculation of the parameters of the H-waveguide, it can be seen that for a crest width of $2t = 2.8$ mm and a distance of $2l = 0.4$ mm, the wave resistance is equal to 45.3 Ohms at the middle frequency of the range and changes little in the working frequency range (from 44.9 Ohms to 46.5 Ohms), i.e. a change wave resistance in the range is $\pm 1.75\%$ of the average value. Increasing the distance $2l$ to the value of $2l = 0.6$ mm gives a value of the wave resistance of $66.3 \Omega \pm 2.6\%$, which can lead to an increase in losses in the small-signal mode.

Control elements of PD are p-i-n diodes. The PD control node is 4 p-i-n diodes installed in a regular line with a wave resistance ρ at the same distance l from each other. The equivalent circuit of the control node is shown in Fig. 7.

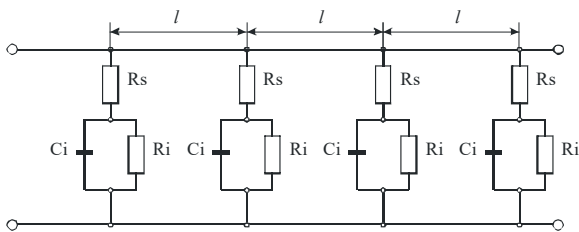


Fig. 7. Equivalent diagram of the control node

Here, R_i is the resistance of the i-layer, C_i is the capacitance of the p-i-n structure, R_s is the resistance of the low-resistance semiconductor and metal. To reduce the voltage standing wave coefficient (SWC) and increase the bandwidth, the distance l and the value of the conductance of the diodes must be chosen so that each stage produces relatively small losses and reflections in the small signal mode, and the reflection introduced by each stage must be compensated on average.

The analysis and synthesis of multi-cascade devices is based on the application of an equivalent circuit in the form

of a cascade connection of concentrated inhomogeneities, the role of which is performed by controlled diodes $VD_1 \dots VD_n$ separated by phase distances Θ (4), represented on the diagram by conductivities $y_1 \dots y_n$ (Fig. 8).

$$\Theta = \frac{2 \cdot \pi \cdot l}{\lambda}, \quad (4)$$

where λ is the wavelength.

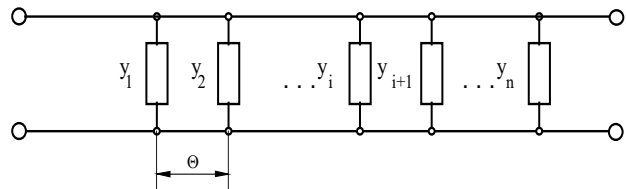


Fig. 8. Equivalent circuit of the PD control node in the form of a cascade connection of concentrated inhomogeneities

In the case of equal distances between the same diodes, matrix theory allows obtaining the ratio for the transmission coefficient of the n-cascade control unit [6].

The paper calculated the initial losses L_0 (in the small signal mode) of the PD control unit using p-i-n diodes with $R_s=0$, $S_i=0.05$ pF, $R_i=20$ k Ω for a line with wave resistance $\rho = 70$ Ohm. In the calculations, the distance l between the diodes was taken into account in the form of the electrical length of the line segment between the diodes at the average frequency of the range

$$\Theta = \frac{2 \cdot \pi \cdot l}{\lambda_{32}},$$

where λ_{32} – is the wavelength in the guide system at a frequency of 32 GHz.

In fig. 9 shows the dependence of the initial losses for the PD control node on the frequency under the assumption that the condition $R_s=0$ is fulfilled for p-i-n diodes [9]. As can be seen from the graphs, the parameter Θ determines not only the value of the initial losses, but also their change in the frequency range.

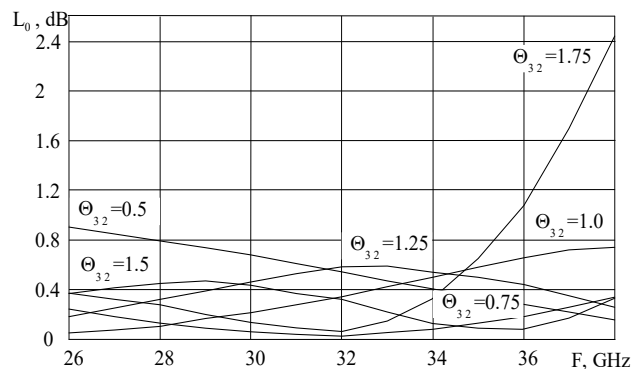


Fig. 9. Dependence of the initial losses on the frequency for the PD control node

From the given results, it follows that to ensure uniform characteristics and small values of initial

attenuation in the operating frequency range, the distances between the diodes of the control unit should be selected according to the expression:

$$l \approx \frac{\lambda_{32}}{8}.$$

In our case, this value is within ~ 0.8 - 1 mm. For the mode of high microwave power levels, when the p-i-n diodes are open, they can be represented as a resistance R. In this case, the calculations show that the control node provides the following values of the input attenuation Lins in the power signal mode. As R changes from 2 to 8 Ohms, Lins changes from 73 to 40 dB.

As can be seen from the results of the calculation carried out in the work, the control node of 4 p-i-n – diodes in the range of the given R values provides a fairly high value of the introduced attenuation.

Thus, it is advisable to use a regular line on the H-waveguide for the construction of the PD. The uniformity of losses in the small-signal mode in this case and their value are ensured by choosing the distance between the p-i-n-diodes and the parameters of the diodes in the small-signal mode. The magnitude of the applied attenuation in the powerful signal mode is determined mainly by the resistance of the p-i-n diodes in this mode with other parameters fixed.

Conclusions. The results of the work make it possible to significantly increase the reliability of the input circuits of microwave receivers of mm-band radio relay stations operating in a complex electromagnetic environment, namely in the presence of the influence of strong external pulse signals. At the same time, they can be used to increase the reliability of new generation mobile networks using 5G technology.

As a result of theoretical and experimental research, the principles of building a self-controlled power limiter have been developed, which, unlike the existing ones, works in a wide range of frequencies (about 40%), and this allows it to be used in transmission systems of 5G technology and provides a relatively low level loss in a small signal mode with a high level of attenuation in a powerful input signal mode.

At the same time, the losses of the experimental sample in the mode of low power of the input signal at the lower frequencies of the operating range did not exceed 0.3 dB. At the upper frequencies of the operating range, losses did not exceed 1.7 dB. The transmission characteristic in the range was quite smooth. In the mode of pulsed high input power, the value of losses was of the order of 30 dB. The signal duty cycle was in the range of 10–100.

Bibliography:

1. Theodore S., Rappaport, Shu Sun, R. Mayzus, Hang Zhao, Y. Azar, K. Wang, George N. Wong, Jocelyn K. Schulz, Mathew Samimi, F. Gutierrez. Millimeter Wave Mobile 1. Communications for 5G Cellular: It Will Work. *IEEE Access journal*. Volume 1. 2013. № 5. P. 335–349.
2. Akhil Gupta, Rakesh Kumar Jha. A Survey of 5G Network: Architecture and Emerging Technologies. *IEEE Access journal*. Volume 3. №7. 2015. P. 1206–1232.
3. Царенко В.Т., Имшенецкий В.В., Борисов М.М. Автоматические устройства СВЧ. Киев, 1983. 152 с.
4. Гусятинер М.С., Горбачев А.И. Полупроводниковые сверхвысоко-частотные диоды. М. 1983. 224 с.
5. Лебедев И.В., Шнитников А.С., Купцов Е.И. Твердотельные СВЧ ограничители - проблемы и решения (обзор). *Изв. ВУЗов, Радиоэлектроника*. 1985. т. 28. № 10. С. 34–44.
6. Дзехцер Г.Б., Орлов О.С. P-I-N – диоды в широкополосных устрой-ствах СВЧ. М. 1970. 199 с.
7. Вайсблат А.В. Коммутационные устройства СВЧ на полупровод-никовых диодах. М. 1987. 120 с.
8. Shnitnikov A.S., Gudkova N.B. Microwave stabilizer low power level with a wide dynamic range. Proceedings 16th International Crimean Conference *Microwave & Telecommunication Technology CriMiCo'2006*. 11–15 September, Sevastopol, Crimea, Ukraine. 2006. P. 148–149.
9. Manko O.O., Katok V.B. Optimization of the MM wave range power limiter design. Proceedings 16th International Crimean Conference *Microwave & Telecommunication Technology CriMiCo'2006*. 11–15 September, Sevastopol, Crimea, Ukraine. 2006. P. 127–128.

Манько О.О., Кунах Н.І., Харлай Л.О., Нікіфоренко К.Б., Коновалов О.Ю., Сотніченко Ю.О. ЗАХИСТ ВХІДНИХ КІЛ ПРИЙМАЧІВ РАДІОРЕЛЕЙНИХ СТАНЦІЙ МІКРОХВИЛЬОВОГО ДІАПАЗОНУ ВІД ПОТУЖНИХ ІМПУЛЬСНИХ ЗАВАД

В роботі запропоновано принципи побудови широкосмугових самокерованих обмежувачів потужності мм – діапазону довжин хвиль. Розглянуто робочий діапазон, що включає в себе область частот, які лежать в межах від 28 GHz до 38 GHz, та які використовує технологія 5G. В якості основи для конструктивної побудови обмежувача вибрано напрямну систему типу H-хвилеводу.

Проведено оптимізацію його конструктивних параметрів. Зокрема вибрано ширину гребеня хвилеводу та відстань між гребенями. Визначено, що ширина гребенів та відстань між ними

суттєво впливають на параметри внесених втрат в режимі малого та великого вхідного сигналу. Зокрема, зменшення ширини гребенів збільшує внесені втрати в режимі великого вхідного сигналу, що є позитивним фактором. Визначено, що аналогічний хід залежності втрат відбувається при зменшенні відстані між гребнями. Проте, в цьому випадку має місце невелике збільшення втрат в режимі малого сигналу. Таким чином, має місце та в роботі визначене оптимальне співвідношення щодо цих розмірів.

Надано методи розрахунку передавальних характеристик (внесеного загасання) самокерованих обмежувачів потужності в режимі малого сигналу. Розглянуто шляхи оптимізації конструкції обмежувача. Вибрано значення просторового інтервалу для розміщення в напрямній системі H -хвилеводу напівпровідникових елементів, що входять у конструкцію обмежувача. Запропонований інтервал забезпечує в режимі малого сигналу широкий робочий діапазон частот, який включає частоти технології мобільного зв'язку 5G. Аналогічну побудову обмежувача можна використати в діапазоні частот 60 GHz, який також використовує технологія 5G.

При цьому втрати експериментального зразка в режимі низької потужності вхідного сигналу на нижніх частотах робочого діапазону не перевищували 0,3 дБ. На верхніх частотах робочого діапазону втрати не перевищували 1,7 дБ. Передавальна характеристика в діапазоні була досить гладкою. В режимі імпульсної високої вхідної потужності значення втрат складало порядку 30 дБ. При цьому шпаруватість вхідного сигналу лежала в межах 10–100.

Результати цієї роботи можуть дозволити значно підвищити надійність вхідних ланцюгів НВЧ-приймачів радіорелейних станцій мм-діапазону, що працюють у складному електромагнітному середовищі, а саме за наявності впливу сильних зовнішніх імпульсних сигналів. Поряд з цим вони можуть бути використані для покращення надійності мобільних мереж нового покоління з використанням технології 5G.

Ключові слова: напрямна система, втрати в режимі сигналу малої потужності, втрати в режимі сигналу великої потужності, діоди з бар'єром Шотткі, р-і-п-діоди.

Могилевич Д.І.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Кононова І.В.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Щиголь Ю.Ф.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

МОДЕЛЬ НАДІЙНОСТІ ОБЛАДНАННЯ ЕЛЕКТРОННОЇ КОМУНІКАЦІЙНОЇ МЕРЕЖІ З УРАХУВАННЯМ ВІДМОВ І ЗБОЇВ

На ефективність функціонування електронної комунікаційної мережі суттєво впливає надійність підсистем та елементів, що її складають, а також складність зв'язків між ними. Незважаючи на постійне удосконалення технологій виробництва високонадійних елементів, вузлів та блоків, а також методів їх збірки на рівні систем та комплексів, зростання складності сучасних та перспективних систем не завжди дозволяє забезпечити необхідну надійність їх функціонування.

Метою даного дослідження є побудова моделі надійності об'єктів (комунікаційного обладнання) електронної комунікаційної мережі, що встановлює зв'язок між показниками надійності об'єкту, характеристиками надійності елементів його структури і параметрами процесу функціонування об'єкту та враховує не тільки стійкі відмови, а також і збої обладнання.

Розглянуто питання оцінки надійності телекомунікаційного обладнання електронної комунікаційної мережі з урахуванням збоїв. Запропоновано використовувати для опису процесів зміни станів досліджуваної системи регенеруючий процес. Отримано розрахункові співвідношення для основних показників надійності: ймовірність безвідмовного функціонування, середнього напрацювання до відмови та коефіцієнта готовності.

Наведено приклад розрахунку впливу збоїв на показники безвідмовності системи зі структурним і часовим резервуванням. Визначено, що при певних умовах виникаючі збої можуть суттєво погіршити показники надійності функціонування комунікаційного обладнання електронної комунікаційної мережі навіть при наявності структурного резерву.

Ключові слова: моделі надійності, стійкі відмови, збої, безвідмовність системи, структурне резервування

Постановка проблеми. Слід відмітити, що до теперішнього часу у більшості фахівців в області дослідження електронної комунікаційної мережі сформувалася думка про недоцільність проведення наукових досліджень і застосування практичних заходів, пов'язаних з кількісною оцінкою та забезпеченням надійності цього класу технічно складних систем. Зневага питанням надійності нерідко обґрунтовується тим, що сучасні засоби зв'язку є досить надійними, а електронної комунікаційної мережі – розгалуженими та такими, які допускають обходи. З цим можна частково погодитись, однак кожен етап розвитку техніки ставить на порядок денний нові задачі, які вимагають свого розв'язку. Це повною мірою

відноситься і до забезпечення надійності мереж зв'язку.

Не звертаючи увагу на те, що сучасне активне мережеве обладнання відноситься до високонадійних елементів, відмови в електронній комунікаційній мережі відбуваються доволі часто.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проведений аналіз робіт [1, с. 445–447; 2, с. 111; 3, с. 271; 4, с. 2–3] показав, що ознаки відмов в електронних комунікаційних мережах можна класифікувати за наступними перехресними групами: 45%...70% – природне старіння елементів апаратного забезпечення маршрутизаторів (в першу чергу зношення інтерфейсних плат) [2, с. 112]; 20% – некоректні операції технічного

обслуговування [2, с. 123]; 17% – збої у програмному забезпеченні маршрутизаторів [3, с. 273]; 16% – збої у електроживленні [3, с. 272]; щодо транспортних мереж – 84% відмов в них обумовлено збоями оптичного обладнання [4, с. 5]. Кожна відмова (збій) у електронній комунікаційній мережі веде до припинення інформаційного обміну на десятки секунд. З урахуванням високих швидкостей передачі, це викликає втрати гігабіт даних та суттєво знижує готовність мережі.

У більшості моделей надійності телекомунікаційного обладнання електронної комунікаційної мережі, які розроблено до теперішнього часу, враховано тільки стійки відмови [5, с. 4–5; 6, с. 84–85; 7, с. 203–207; 8, с. 257–259]. Під моделлю надійності розуміють математичну модель, що встановлює зв'язок між показниками надійності об'єкту, характеристиками надійності елементів його структури та параметрами процесу функціонування об'єкту [9, с. 102].

Формулювання цілей статті. Метою статті є побудова моделі надійності об'єктів (комунікаційне обладнання) електронної комунікаційної мережі, яка враховує не тільки стійки відмови, а також і збої обладнання.

Під збоєм будемо розуміти самоусуваючу відмову, або однократну відмову, яка усувається незначним втручанням оператора [10, с. 24]. Відмінною ознакою збою є те, що працездатний стан об'єкту може бути забезпечено без ремонту, наприклад, шляхом впливу оператора на органи керування. Характерним прикладом збою є «зависання» телекомунікаційного обладнання (маршрутизатора, модему, тощо), або ПЕОМ, що усувається повторним перезапуском програми. Пошкодження збійного характеру не впливають на працездатність телекомунікаційного обладнання, але при наявності резервного обладнання стимулюють його перехід в основний режим. Оскільки цей перехід здійснюється успішно з ймовірністю відмінною від одиниці, то зі зростанням інтенсивності збоїв зростає частка відмов (зривів функціонування) телекомунікаційного обладнання, які виникають при підключенні резервного обладнання.

Тому, для отримання більш достовірних результатів при оцінці надійності функціонування комунікаційного обладнання електронної комунікаційної мережі необхідно враховувати не тільки відмови, а також і їх збої.

Виклад основного матеріалу. Постановка задачі. Нехай є електронна комунікаційна мережа, яка складається з напрямів зв'язку. Під напрямом

зв'язку розуміємо сукупність шляхів встановлення з'єднань між двома комутаційними центрами. Будемо вважати, що шляхи (системи) в кожному напрямку незалежні. Розглянемо систему (шлях), що складається в загальному випадку з n основних ($n \geq 1$) та m резервних ($m \geq 1$) елементів (для спрощення міркувань будемо вважати, що всі елементи в системі ідентичні), які можуть відмовляти та відновлюватись. Позначимо через λ_i сумарну інтенсивність відмов елементів у деякий момент часу за умови, що в цей момент непрацездатні i елементів. Значення λ_i визначається числом основних та резервних елементів, тобто

$$\lambda_i = [n + (m - i)\alpha] \lambda, \quad i = \overline{0, m}, \quad (1)$$

де α – коефіцієнт навантаження резервного елемента ($0 \leq \alpha \leq 1$). З формули (1) випливає, що у випадках ненавантаженого ($\alpha = 0$) структурного резерву $\lambda_i = n\lambda$, $i = \overline{0, m}$; навантаженого ($\alpha = 1$) резерву $\lambda_i = (n + m - i)\lambda$, $i = \overline{0, m}$; полегшеного ($0 < \alpha < 1$) резерву $\lambda_i = [n + (m - i)\alpha]\lambda$, $i = \overline{0, m}$.

Будемо вважати, що обладнання основних елементів є джерелом не тільки стійких відмов, але й збоїв з інтенсивністю λ_z . В момент виникнення відмови або збою при наявності резервного елемента починається його підключення.

Ремонтний орган включає l ремонтних бригад ($l \geq 1$). Час відновлення працездатності одного елемента розподілено за довільним законом $F_b(t)$ з кінцевим математичним очікуванням (МОЧ) \bar{t}_b . Кожна бригада може одночасно ремонтувати тільки один елемент, і кожний елемент відновлюється лише однією з бригад. Якщо всі бригади зайняті та відмовляє ще один елемент, то він стає в чергу на ремонт. Бригада, яка закінчила відновлення одного з елементів, бере в ремонт перший зі стоячих у черзі елементів. Будемо вважати, що ремонт повністю відновлює вихідні властивості елемента. Нехай час підключення t_n резервного елемента взамін основного, що відмовив – випадкова величина (ВВ) з довільною функцією розподілу (ФР) $F_n(t)$ та кінцевим МОЧ \bar{t}_n , а допустимий час підключення, що визначає використовуваний в системі поповнюваний резерв часу, $t_d = \text{const}$.

Приймемо наступні допущення: при відмові $(m + 1)$ -го елемента система вимикається та нові відмови не виникають, система відновлює свою роботу в момент закінчення ремонту одного з $m + 1$ елементів; тривалість ремонту набагато менше середнього напрацювання елемента між відмовами ($\bar{t}_b \ll 1/\lambda$) (випадок „швидкого відновлення”); тривалість підключення і величина резерву часу значно менше середнього напрацювання між відмовами та збоями обладнання ($\bar{t}_n \ll 1/\lambda_i$; $t_d \ll 1/\lambda_i$,

$i = \overline{0, m}$; $\bar{t}_n \ll 1/\lambda_3$; $\bar{t}_d \ll 1/\lambda_3$) і середньої тривалості ремонту ($\bar{t}_n \ll \bar{t}_B$; $\bar{t}_d \ll \bar{t}_B$); якщо підключення резервного елемента взамін основного, що відмовив відбувається за причини виникнення збою, то після підключення цей факт практично миттєво встановлюється системою контролю і елемент поміщується в резерв.

Прийняті допущення дозволяють знехтувати затримкою системи в області працездатних станів на час (t_n, t_d) при відмовах або збоях основних елементів та вважати, що після відмови ($m+1$)-го елемента не один з $m+1$ елементів не встигне відновитися та підключиться в роботу за допустимий час t_d з ймовірністю одиниця.

Відмова системи (зрив функціонування) може виникнути у двох випадках: в момент перевищення часу підключення допустимої величини ($t_n > t_d$) або в момент відмови ($m+1$)-го елемента. Необхідно побудувати моделі надійності системи, тобто отримати для прийнятих вихідних умов розрахункові співвідношення для основних показників надійності: ймовірність безвідмовного функціонування $P(t, t_d)$, середнього напрацювання до відмови $T_0(t_d)$ та коефіцієнта готовності $K_T(t_d)$.

Основні результати. Нехай в початковий момент часу всі елементи працездатні. Позначимо через $\gamma(t)$ стан системи в момент $t > 0$, обумовлене кількістю непрацездатних елементів. Нескладно бачити, що процес зміни станів системи може бути описано регенеруючим процесом, точки регенерації якого – це моменти потрапляння процесу $\gamma(t)$ в 0 (моменти завершення ремонту всіх елементів, що відмовили). Період регенерації складається з двох частин: $\xi = \xi_1 + \xi_2$, де ξ_1 – період, протягом якого всі елементи працездатні; ξ_2 – період, на якому виникає відмова або збій хоча б одного елемента. У відповідності з прийнятими вихідними умовами $P\{\xi_1 < t\} = 1 - \exp[-(\lambda_0 + \lambda_3)t]$. Позначимо через $x(t)$ число тривалих підключень ($t_n > t_d$) від останньої точки регенерації до моменту t . Введемо далі в розгляд двомірний процес $\zeta(t) = \{y(t), x(t)\}$, який також буде регенеруючим процесом, причому період його регенерації співпадає з періодом регенерації процесу $\gamma(t)$. Відмова системи може виникнути тільки на другій частині періоду регенерації ξ_2 в момент, коли перша компонента $\gamma(t)$ переходить з m в $m+1$ або друга компонента $x(t)$ переходить з 0 в 1. Позначимо ймовірність цієї події через q_0 .

У відповідності з результатами робіт [5, с. 5; 6, с. 85] в нашому випадку можна записати асимптотичну формулу для розподілу часу T_0 до першої відмови досліджуваної системи:

$$\lim_{(\lambda_0 + \lambda_3)\bar{t}_n \rightarrow 0} P\{(\lambda_0 + \lambda_3)q_0T_0 > x\} = e^{-x},$$

яка означає, що при „швидкому” відновленні працездатності елементів для ймовірності безвідмовного функціонування і середньому напрацюванні до відмови системи справедливі прості наближені вирази:

$$P(t, t_d) \approx \exp[-(\lambda_0 + \lambda_3)q_0t], \quad (2)$$

$$T_0(t_d) \approx 1/(\lambda_0 + \lambda_3)q_0, \quad (3)$$

де λ_0 визначається з формули (1) при $i = 0$.

Наразі задача звелась до асимптотичної оцінки ймовірності q_0 , розв'язок якої викладено нижче. Нехай подія A є відмовою $m+1$ елементів на одному періоді регенерації, а B – поява довготривалого підключення $t_n > t_d$ на тому ж періоді. Позначимо через $P\{A\}$ та $P\{B\}$ ймовірності відповідних подій. Тоді з урахуванням незалежності цих подій шукана ймовірність q_0 визначається формулою:

$$q_0 = P\{A \cup B\} = P\{A\} + P\{B\bar{A}\}. \quad (4)$$

Перший доданок у формулі (4) оцінено в роботі [8, с. 251], де показано, що якщо λ_k та m фіксовані і $\beta_{m+1}/\beta_1^m \rightarrow 0$, де $\beta_{m+1} = \int_0^\infty x^{m+1} dF_B(x)$, то

$$P\{A\} \approx \lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_m \int_0^\infty \frac{x^{m-1}}{(m-1)!} [F_B^*(x)]^{l-1} \frac{1 - F_B(x)}{(l-1)!} dx, \quad (5)$$

$$\text{де } F_B^*(x) = \int_x^\infty [1 - F_B(t)] dt.$$

Проведемо оцінку другого доданку у виразі (4). Нехай подія B_0 означає появу тривалого підключення $t_n > t_d$ на початку другої частини ξ_2 періоду регенерації, а B_1 – поява такого підключення всередині періоду ξ_2 (тобто не при першому, а при наступних відмовах та збоїв основних елементів протягом часу ξ_2). Зрозуміло, що на одному періоді регенерації може виникнути подія B_0 або B_1 (в силу прийнятих вихідних умов сумісна їх поява неможлива). Враховуючи це, запишемо вираз для другого доданку у формулі (4) в наступному виді:

$$P\{B\bar{A}\} = P\{B_0\bar{A}\} + P\{B_1\bar{A}\} = P\{B_0\}[1 - P\{A\}] + \theta P\{B_1\}, \quad (6)$$

де θ – довільне число, яке приймає значення в інтервалі $(0, 1)$; $P\{B_0\} = q(n\lambda + \lambda_3)/(\lambda_0 + \lambda_3)$ – ймовірність появи довготривалого підключення на початку другої частини ξ_2 періоду регенерації ξ причому

$$q = P\{t_n > t_d\} = 1 - F_n(t_d). \quad (7)$$

Оскільки при «швидкому» відновленні працездатності ймовірність відмови $m+1$ елементів на одному періоді регенерації – величина дуже мала ($P\{A\} \rightarrow 0$), то

$$P\{B\bar{A}\} = q(n\lambda + \lambda_3)/(\lambda_0 + \lambda_3) + \theta P\{B_1\}, \quad 0 < \theta < 1, \quad (8)$$

і нам залишається оцінити тільки ймовірність $P\{B_1\}$. Зауважимо λ_k на $\lambda^* = \max_{0 \leq k \leq m} \lambda_k$ і l на 1, цим ми тільки збільшимо ймовірність $P\{B_1\}$. Позначимо після такої заміни відповідну подію через B_1^* , а її ймовірність через $P\{B_1^*\}$. Представимо розглядаємий процес функціонування системи, як про-

цес обслуговування потоку, що надходить (елементів, що відмовили та збоїв) з інтенсивністю $(\lambda^* + \lambda_3)$ в системі типу $M / G / 1$. Нехай v – число вимог, що прийшли на періоді ξ_2 зайнятості в цій системі. Тоді для ймовірності $P\{B_1^*\}$ можна записати наступний вираз:

$$P\{B_1^*\} = (1-q) \sum_{k=1}^{\infty} P\{v=k\} [1 - (1-q)^{k-1}] \leq (1-q) \sum_{k=1}^{\infty} (k-1) q P\{v=k\} \leq q(Mv-1), \quad (9)$$

де Mv – МОЧ ВВ v , що визначається відомою формулою:

$$Mv = 1 / [1 - (\lambda^* + \lambda_3) \bar{t}_b]. \quad (10)$$

Підставляючи вирази (10) в (9), отримуємо:

$$P\{B_1^*\} \leq \frac{(\lambda^* + \lambda_3) \bar{t}_b q}{1 - (\lambda^* + \lambda_3) \bar{t}_b}.$$

Звідси випливає, що оскільки $(\lambda^* + \lambda_3) \bar{t}_b q / [1 - (\lambda^* + \lambda_3) \bar{t}_b] \rightarrow 0$ при $\bar{t}_b \rightarrow 0$, то $P\{B_1^*\} \rightarrow 0$ і

$$P\{BA\} \approx q(n\lambda + \lambda_3) / (\lambda_0 + \lambda_3). \quad (11)$$

Отже, остаточно з урахуванням виразів (5) та (11) можна записати наступну формулу для ймовірності q_0 , що входить у (2) та (3):

$$q_0 = \frac{q(n\lambda + \lambda_3)}{\lambda_0 + \lambda_3} + \sum_{i=1}^m \lambda_i \int_0^{\infty} \frac{x^{m-i}}{(m-i)!} \left[\int_x^{\infty} (1 - F_b(t)) dt \right]^{i-1} \frac{1 - F_b(x)}{(i-1)!} dx. \quad (12)$$

В часткових випадках при обмеженому ($l=1$) та необмеженому ($l=m+1$) відновленнях загальна формула (12) спрощується:

$$q_0 = \begin{cases} \frac{q(n\lambda + \lambda_3)}{\lambda_0 + \lambda_3} + \frac{\beta_m}{m!} \prod_{i=1}^m \lambda_i, & l=1, \\ \frac{q(n\lambda + \lambda_3)}{\lambda_0 + \lambda_3} + \frac{\beta_1^m}{m!} \prod_{i=1}^m \lambda_i, & l=m+1, \end{cases} \quad (13)$$

де $\beta_m = \int_0^{\infty} x^m dF_b(x)$.

З формули (13) можна зробити важливий для практики висновок: при необмеженому відновленні ($l=m+1$) показники надійності системи, що розглядається не залежать від виду ФР $F_b(t)$ часу відновлення працездатності елементів, а залежать тільки від МОЧ ВВ t_b .

Отримані вирази (12) та (13) справедливі за умови [7, с. 209-213]:

$$\rho C \beta_{m+1} / \beta_1^{m+1} \ll 1, \quad (14)$$

де C – коефіцієнт, величина якого визначається кількістю основних та резервних елементів, а також ступенем навантаженості резерву, а $\rho = \lambda \bar{t}_b$.

Таким чином, підставляючи у вирази (2) та (3) формули (13) з урахуванням (1), після нескладних перетворень остаточно отримаємо:

$$P_0(t, t_d) \approx \exp(-t/T_0(t_d)), \quad (15)$$

$$T_0(t_d) \approx \frac{1}{\lambda(n + m\alpha + k_3)} \left[\frac{q(n + k_3)}{n + m\alpha + k_3} + \frac{x \rho^m}{m!} \prod_{i=0}^{m-1} (n + i\alpha) \right]^{-1}, \quad (16)$$

де $k_3 = \frac{\lambda_3}{\lambda}$; $x = \begin{cases} 1, & l = m+1, \\ \beta_m / \beta_1^m, & l = 1. \end{cases}$

При $\lambda = 1$ або $\lambda = 0$ з формули (16) отримуємо розрахункові співвідношення для випадків навантаженого або ненавантаженого структурного резерву.

Коефіцієнт готовності системи визначається формулою:

$$K_r = \frac{T_0(t_d)}{T_0(t_d) + T_b}, \quad (17)$$

де T_b – середній час відновлення системи.

Розглянемо випадок, коли середній час підключення \bar{t}_n резервного елемента значно менше середнього часу відновлення \bar{t}_b одного елемента, тобто $\bar{t}_n \ll \bar{t}_b$. У цьому випадку часом підключення \bar{t}_n можна знехтувати і для розрахунку середнього часу відновлення системи T_b може бути використана формула [7, с. 214]:

$$T_b = \frac{A(m+1, l)}{A(m, l)}, \quad (18)$$

де

$$A(m+1, l) = \int_0^{\infty} \frac{x^{m+1-l}}{(m+1-l)!} \left[\int_x^{\infty} (1 - F_b(t)) dt \right]^{l-1} \frac{1 - F_b(x)}{(l-1)!} dx, \quad (19)$$

$$A(m, l) = \int_0^{\infty} \frac{x^{m-l}}{(m-l)!} \left[\int_x^{\infty} (1 - F_b(t)) dt \right]^{l-1} \frac{1 - F_b(x)}{(l-1)!} dx. \quad (20)$$

У випадках повністю обмеженого ($l=1$) або необмеженого ($l=m+1$) відновлення формули (19) та (20) спрощуються:

$$A(m+1, l) = \begin{cases} \beta_{m+1} / (m+1)! & \text{при } l=1, \\ \beta_1^{m+1} / (m+1)! & \text{при } l=m+1, \end{cases} \quad (21)$$

$$A(m, l) = \begin{cases} \beta_m & \text{при } l=1, \\ m! & \text{при } l=m+1, \end{cases} \quad (22)$$

і вираз для \bar{T}_b приймає вигляд:

$$\bar{T}_b = \begin{cases} \frac{\beta_{m+1}}{(m+1)\beta_m} & \text{при } l=1, \\ \frac{\beta_1}{m} + 1 & \text{при } l=m+1. \end{cases} \quad (23)$$

При проведенні розрахунків за формулою (23) можна використовувати вирази для β_m , $m \geq 1$, з табл. 1, де через $\Phi(x)$ позначена функція Лапласа.

Таким чином, розрахунок коефіцієнта готовності системи слід проводити за формулою (17) з використанням виразів (16) та (23).

Оцінка похибки наближених формул. Як впливає з нерівності (14), похибка наближених формул (15) і (16) при фіксованих значеннях m і C визначається в основному величиною малого параметру $\rho = \lambda \bar{t}_b$. На рис. 1 наведено графіки, що характеризують залежність відносної похибки δ формули (16) від значень малого параметру $\rho = \lambda \bar{t}_b$, m і $q = P\{t_n > t_d\}$. Розрахунки проводились для випадку $\lambda = 10^{-2}$ 1/год.; $n = \alpha = l = 1$; $\lambda_3 = 0$.

Аналіз графіків дозволяє зробити наступні висновки:

Формули для m -го начального моменту функції розподілу $F_B(t)$

Види функцій розподілу $F_B(t)$	Формула для $\beta_m, m \geq 1$
Експоненціальний	$\frac{m!}{\mu^m} = \frac{1}{\mu^m} \prod_{i=1}^m i$
Усічений нормальний	$\sum_{i=0}^m \binom{m}{i} \bar{t}_B^i \sigma_B^{m-i} I_{m-i}, I_0 = \sqrt{2\pi} \left[0,5 + \Phi\left(\frac{\bar{t}_B}{\sigma_B}\right) \right], I_1 = \exp\left(-\frac{\bar{t}_B^2}{2\sigma_B^2}\right),$ $I_k = \left(-\bar{t}_B/\sigma_B\right)^{k-1} I_1 + (k-1)I_{k-2}, k \geq 2$
Релея	$\beta_1 = \bar{t}_B = \sqrt{(\pi/2)}\sigma_B; \beta_2 = 2\sigma_B^2; \beta_m = m\sigma_B^2 \beta_{m-2}, m > 2$
Ерланга k -го порядку	$\frac{(k+m-1)!}{(k-1)!\mu^m} = \frac{1}{\mu^m} \prod_{i=0}^{m-1} (k+i)$

наближена формула (16) володіє достатньо високою точністю (відносна похибка складає одиниці відсотків і менше) при значеннях малого параметру $\rho \leq 0,01$, що представляє найбільший практичний інтерес;

зменшення часу відновлення елементів дозволяє покращити показники надійності системи та підвищити точність наближених формул;

зі збільшенням резерву часу t_d (зменшуємо ймовірність q) відносна похибка δ зростає. Це можна пояснити зменшенням частки відмов системи за рахунок тривалого підключення ($t_n > t_d$), що дають експоненціальні складові часу $T_0(t_d)$ в загальному потоці відмов системи;

при зростанні числа резервних елементів m похибка зменшується.

Приклад розрахунку. Розглянемо вплив збоїв на показники безвідмовності класу систем, що розглядаються.

В табл. 2 наведено результати розрахунків за формулою (16) середнього напрацювання до відмови системи зі структурним і часовим резервуванням при різних значеннях інтенсивності збоїв, кількості резервних елементів та ймовірності q відмови системи при переключенні. Система містить один основний елемент ($n=1$), навантажений резерв ($\alpha=1$), $\rho=\lambda=0,001/\text{год.}$, відновлення обмежене ($l=1$). З табл. 2 видно, що збої значно вплива-

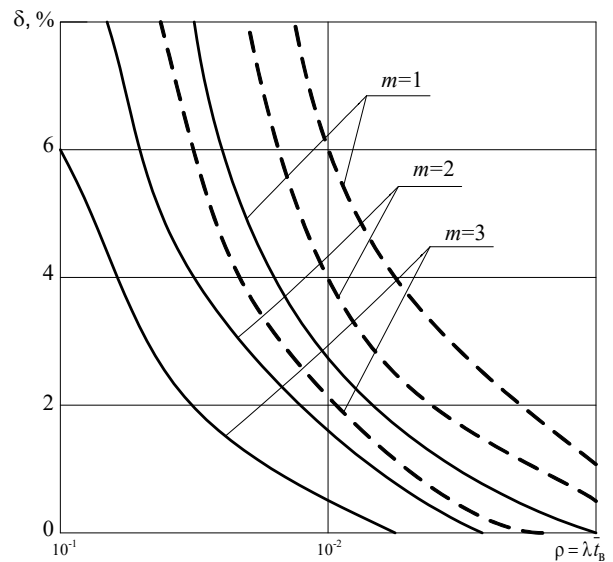


Рис. 1. Графіки залежності відносної похибки формули (16) від величини малого параметру ρ при різних значеннях m : — $q = 0,01$, - - - $q = 0$

ють на безвідмовність системи. Так, при $K_3=10$ та $q=0,05$ збільшення кількості резервних елементів до двох призводять до незначного (всього на 4%) збільшення середнього напрацювання до відмови, а використання третього резервного елемента зовсім не дає збільшення показника. Це пояснюється більш частим підключенням резервних

Таблиця 2

Значення середнього напрацювання до відмови системи $T_0(t_d)$

$K_3=\lambda_3/\lambda$	Ймовірність $q=0,005$			Ймовірність $q=0,025$			Ймовірність $q=0,05$		
	$m=1$	$m=2$	$m=3$	$m=1$	$m=2$	$m=3$	$m=1$	$m=2$	$m=3$
0	4000	18868	19984	2222	3953	3999	1429	1988	2000
5	2000	3300	3333	588	665	667	313	333	333
10	1333	1808	1818	339	363	364	175	182	182
20	800	950	952	183	190	190	93	95	95

елементів при збільшенні інтенсивності збоїв та збільшенням при цьому кількості відмов системи при $t_{\Pi} > t_{\text{д}}$. Можливо навіть виникнення парадоксальної ситуації (в нашому випадку при $K_3=20$ та $q=0,05$), коли застосування структурного резервування призводить до зменшення середнього напрацювання до відмови системи порівняно з середнім напрацюванням до відмови одного елемента (в нашому випадку $1/\lambda=100$ год.), що знаходиться в основному режимі роботи.

Висновки. Таким чином отримано аналітичні вирази для основних показників надійності обладнання електронної комунікаційної мережі, в яких наряду зі стійкими відмовами враховані і збої. Показано, що при певних умовах виникаючі збої можуть суттєво погіршити показники надійності функціонування навіть при наявності структурного резерву. Тому обґрунтуванню шляхів та методів боротьби зі збоями і зменшення їх впливу на процес функціонування обладнання необхідно приділяти серйозну увагу.

Список літератури:

1. Goyal M., Soperi M., Baccelli E., Choudhury G., Shaikh A., Hosseini S. H., Trivedi K. Improving Convergence Speed and Scalability in OSPF: A Survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2012. № 14(2). P. 443–463. URL: <https://hal.science/hal-00651596/document> (дата звернення: 7.03.2023).
2. Zhong W., Wang L., Liu Z. Reliability Evaluation and Improvement of Islanded Microgrid Considering Operation Failures of Power Electronic Equipment. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*. 2020. № 8(1). P. 111–123. DOI: 10.35833/MPCE/2018.000666.
3. Kim Y., Song K., Pham H., Chang I. A Software Reliability Model with Dependent Failure and Optimal Release Time. *Symmetry*. 2022. № 14. P. 270–292. DOI: 10.3390/sym14020343.
4. Hasan O. Formal analysis of continuous-time systems using fourier transform. *Journal of symbolic computation*. 2017. DOI: 10.1016/j.jsc.2018.04.004.
5. Tandon N., Patel N. An efficient implementation of multichannel transceiver for manet multinet environment. *In Proc. 10th IEEE Intern. Conf. Computing, Communication and Networking Technologies*. 2019. P. 1–6. DOI: 10.1109/ICCCNT45670.2019.8944505.
6. Wentao Z., Mathaios P., Milanovic J.V. Reliability and vulnerability assessment of interconnected ict and power networks using complex network theory. *In Proc. 2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting*. 2018. P. 78–85. DOI: 10.1109/PESGM.2018.8586596.
7. Ahmada W., Pervez U., Qadirb J. Reliability modeling and analysis of communication networks. *Journal of Network and Computer Applications*. 2017. № 78. P. 191–215. DOI: 10.1016/j.jnca.2016.11.008.
8. Креденцер Б.П. Надійність систем з надлишковістю: методи, моделі, оптимізація: монографія / Б.П. Креденцер, О.М. Буточнов, А.І. Міночкін, Д.І. Могилевич. Київ, 2013. С. 242–264.
9. Mogilevich D, Kononova I. Improved estimates for the reliability indicators of information and communication network objects with limited source information. *Advances in Information and Communication Technologies. Processing and Control in Information and Communication Systems*. 2019. P. 101-117. DOI: 10.1007/978-3-030-16770-7_5.
10. ДСТУ 2860–94: Надійність техніки. Терміни та визначення. Чинний від 1996–01–01. *Держстандарт України*. 1994. Ст. 90.

Mogylevych D.I., Kononova I.V., Shchyhol Yu.F. RELIABILITY MODEL OF ELECTRONIC COMMUNICATION NETWORK EQUIPMENT TAKING REFUSALS AND FAILURES INTO ACCOUNT

The reliability of the subsystems and elements that make up it, as well as the complexity of the connections between them, significantly affects the effectiveness of the functioning of the electronic communication network. Despite the constant improvement of technologies for the production of highly reliable elements, nodes and blocks, as well as their assembly methods at the level of systems and complexes, the increasing complexity of modern and promising systems does not always allow ensuring the necessary reliability of their functioning.

The purpose of this study is to build a model of the reliability of objects (communication equipment) of an electronic communication network, which establishes a relationship between the reliability indicators of the object, the reliability characteristics of its structural elements and the parameters of the object's functioning process, and takes into account not only failure rates, but also as well as equipment failures.

The issue of reliability assessment of telecommunication equipment of electronic communication network, taking into account failures, is considered. It is proposed to use the regenerative process to describe the processes of changing the states of the studied system. Estimated ratios were obtained for the main reliability indicators: the probability of failure-free operation, the average working time before failure, and the availability ratio.

An example of calculating the impact of failures on system reliability indicators with structural and time redundancy is given. It was determined that under certain conditions, emerging failures can significantly worsen the reliability indicators of the functioning of the communication equipment of the electronic communication network, even in the presence of a structural reserve.

Key words: reliability models, refusals rates, failures, system reliability, structural redundancy.

Павлов Л.М.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Яганов П.О.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ОПТИМІЗАЦІЯ ІНТЕГРАЛЬНОГО ПОРОГОВОГО СЕНСОРА ТЕМПЕРАТУРИ

У статті висвітлюється оптимізація інтегрального порогового сенсора температури (ІПСТ), який покликаний захистити критичний вузол – потужний силовий транзистор стабілізатора напруги, лінійного чи імпульсного. Особливість такого сенсора полягає в тому, що його вихідний сигнал аналоговий і формується у вигляді істотного перепаду напруги, що надходить до блоку управління силовим елементом інтегральної мікросхеми. Якість такого сенсора оцінюється похибкою точки спрацювання за температурою. Точка спрацювання своєю чергою має початкову температуру наростання сигналу та температуру його завершення. Це певний інтервал температури, в якому формується вихідний сигнал ІПСТ. Відповідно, чим вузчий цей інтервал, тим вище якість сенсора. Нарешті третій фактор оцінки якості сенсора полягає в тому, яку площу на кристалі інтегральної мікросхеми займають елементи сенсора: чим менша площа – тим дешевша мікросхема, тим більша її конкурентоздатність. Отже, менше площа – вища якість. Ці три фактори складають критерій якості при оптимізації ІПСТ, що покладені в формування цільової функції процесу оптимізації. Цільова функція формується відповідно мінімаксного критерію оптимальності, що означає мінімальне значення цільової функції за максимуму значень відхилень компонентів вектора цільової функції оптимізації. Вагові коефіцієнти компонентів вектора компонентів цільової функції вибираються методом експертних оцінок. Функцію оптимізації конкретизують параметри елементів схеми моделі ІПСТ: значення електричних режимів роботи транзисторів, їх розміри, значення опору резисторів. Для пошуку оптимальної точки цільової функції запропоновано алгоритм, що передбачає пошуки локальних оптимальних точок і на їх основі зваженим усередненням отримання глобального оптимуму. Запропоновано перевірки в точці глобального оптимуму та рішення в разі порушення критерію якості. Алгоритм пошуку оптимального рішення в цьому випадку полягає в тому, що допустимі значення компонентів можуть приймати лише значення в рамках того інтервалу, що визначений як межа допуску на виготовлення за чинним технологічним процесом. Доцільність такого підходу полягає в тому, що цим враховуються обмеження на параметри компонентів з урахуванням конструктивно-топологічних обмежень технологічного процесу виготовлення зразків ІПСТ.

Ключові слова: інтегральний пороговий сенсор температури, похибка сенсора, оптимізація, критерій оптимізації, цільова функція, змінні оптимізації.

Постановка проблеми. Дослідження світового ринку температурних сенсорів [1] свідчить про те, що в передових країнах зростає потреба в різноманітних температурних сенсорах як для побутової, так і для військової техніки. Зокрема, в країнах з найвищими військовими витратами, рисунок 1, спостерігається відповідне зростання попиту і на напівпровідникові температурні сенсори. Водночас ці сенсори температури мають широке поле застосування в радіоелектронній апаратурі як у вигляді окремого виробу, так і в складі інтегральних мікросхем, в першу чергу стабілізаторів напруги, для захисту від впливу надлиш-

кової температури. В інтегральних мікросхемах точність спрацювання сенсора має велике значення. Проблема полягає в тому, що площа мікросхем з потужними вихідними каскадами в значній мірі визначає вартість цих мікросхем. Отже, чим менша площа, тим менша вартість інтегральної мікросхеми та більша конкурентоздатність. Тому істотне прагнення кожного виробника зменшити розмір кристала шляхом зменшення розмірів вихідних компонентів, що можуть займати 30...50% площі кристала. Але зменшення розмірів вихідних транзисторів своєю чергою сприяє їх перегріванню і, в наслідок цього, вигорянню

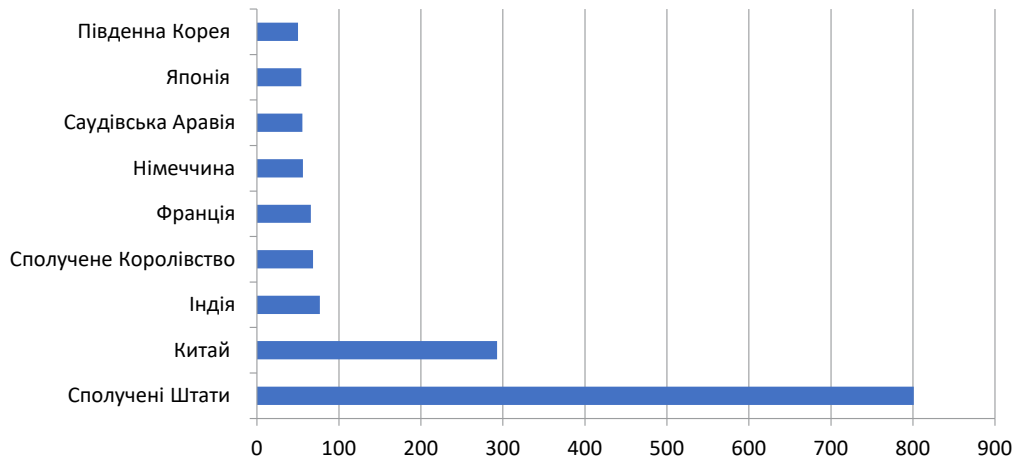


Рис. 1. Військові витрати в мільярдах доларів США

через збільшення щільності струму. Отже, в певний момент, що визначається критичною температурою, має спрацювати сенсор. В результаті, наприклад, в перетворювачах DC-DC, це дасть змогу знизити шпаруватість імпульсів запуску вихідного ключа, і навіть зменшити частоту його запуску, як це забезпечено в інтегральному перетворювачі DC-DC LM2596. Тож, чим точніший сенсор, тим меншим може бути вихідний ключ, бо не потрібно виконувати його топологію з запасами на велику похибку сенсора. В результаті – вища конкурентоздатність інтегральної мікросхеми.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз надійності сенсорних систем [2] доводить, що галузь температурних сенсорів є актуальною і стає частиною великих систем.

Моделювання температурних сенсорів за допомогою середовища LabVIEW (Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench) представлено в публікації [3]. Робота вказує на зацікавленість в моделюванні напівпровідникових сенсорів температури, що підкреслює необхідність обраного напрямку досліджень.

В роботі [4] досліджується перехід від аналогового датчика до цифрового та інтелектуального з метою виявлення температурних аномалій. Такий підхід наводить на думку, що пороговий сенсор температури власне і є певною мірою переходом від лінійного аналогового сенсора до приладу діагностики критичного стану, коли мусить спрацювати певний регулятор, що внесе зміну в температурний процес.

В дослідженні [5] представлено доказ концепції для нового підходу до вимірювання температури, який поєднує в собі теплове розширення та сумісний механізм. Для цього сумісного

механізму досягається температурна чутливість $28,5 \text{ мкм}/^\circ\text{C}$. Ця робота лише частково перетинається з областю напівпровідникових сенсорів температури, де ефекти градієнта температури та деформацій кристала обов'язково мають бути враховані. Але сутність вимірювання температури в напівпровідникових сенсорах має іншу природу, а явище деформацій кристала може бути враховано у відповідних конструкторсько-топологічних обмеженнях на топологію та конструкцію мікросхеми.

В наступній роботі [6] розглянута матриця діодних давачів температури, що створена для вимірювання розподілу температури на невеликій поверхні з високою роздільною здатністю. Вона складається з масиву 32×32 діодів (1024 діодів) для визначення температури на площі поверхні $8 \text{ мм} \times 8 \text{ мм}$ і була виготовлена за допомогою техніки дуже великомасштабної інтеграції (VLSI).

Формулювання цілей статті. В роботах [1-6] вказано на зацікавленість в напівпровідникових сенсорах температури та на розвиток цієї тематики, що доводить актуальність даної роботи. Але теми дослідження порогових сенсорів температури в інтегральному виконанні (ІПСТ) в них не запропоновано. Тому мета даної роботи полягає у пошуку оптимальних номінальних значень елементів ІПСТ з урахуванням технологічного процесу створення інтегральної мікросхеми, що певною мірою доповнить дослідження з даної теми.

Для досягнення мети необхідно розв'язувати задачу центрування точки спрацювання ІПСТ. Така задача може бути вирішена застосуванням оптимізації параметрів моделі сенсора.

Виклад основного матеріалу. Особливість такого сенсора полягає в тому, що його природа

має аналоговий характер, але вихідний сигнал формується у вигляді істотного перепаду напруги, що надходить до блоку управління силовим елементом інтегральної мікросхеми. Відповідно потрібно сформулювати критерій якості (оптимальності), визначити цільову функцію, змінні оптимізації, обмеження та метод пошуку оптимуму. Критерій оптимальності враховує те, що при виготовленні ПСТ параметри елементів приймають випадкові значення, які будуть відрізнятися від пластини до пластини, від партії пластин до наступної партії. Тому, в яких межах буде забезпечена точка спрацювання з температури, наприклад $170\text{ }^{\circ}\text{C} \pm \delta$, де δ – похибка ПСТ, потрібно визначити з урахуванням інтервалів допустимих значень елементної бази ПСТ.

Отже, якість ПСТ оцінюється похибкою точки спрацювання за температурою. Точка спрацювання своєю чергою має початкову температуру наростання сигналу та температуру його завершення. Це певний інтервал температури, в якій формується вихідний сигнал ПСТ. Відповідно, чим вужчий цей інтервал, тим вище якість сенсора. Нарешті третій фактор оцінки якості сенсора полягає в тому, яку площу на кристалі інтегральної мікросхеми займають елементи сенсора: чим менша площа – тим дешевша мікросхема, тим більша її конкурентоздатність. Отже, менше площа – вища якість.

Ці три фактори складають критерій якості ПСТ для оптимізації, що покладені в формування цільової функції процесу оптимізації. Цільова функція формується відповідно мінімаксного критерію оптимальності, що означає мінімальне значення цільової функції за максимуму значень відхилень компонентів вектора цільової функції процесу оптимізації. Вагові коефіцієнти компонентів вектора цільової функції вибираються методом експертних оцінок. В якості змінних Змінними оптимізації виступають параметри елементів схеми моделі ПСТ: значення електричних режимів роботи транзисторів, їх коефіцієнти підсилення та розміри, значення опору резисторів.

Для розв'язання поставленої задачі можна скористатися досвідом [8] з пошуку локальної оптимальної точки типової моделі ПСТ, що наведена на рисунку 2. Схема забезпечує критерій якості з точки зору швидкості наростання вихідного сигналу ПСТ в перехідній області внаслідок посилення за постійним струмом. Разом з тим схема містить лише три транзистори та цим відповідає вимогам критерію якості за мінімальною площею.

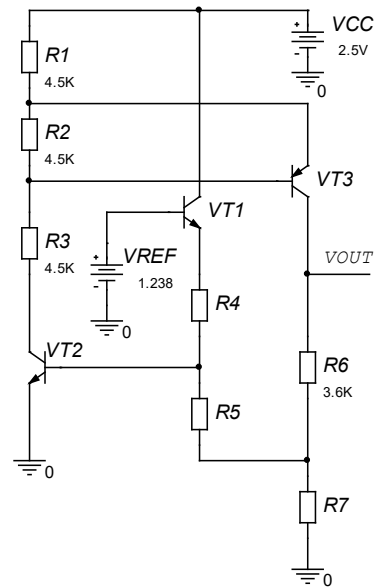


Рис. 2. Схема моделі інтегрального порогового сенсора температури

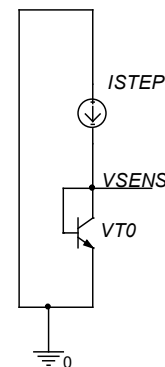


Рис. 3. Схема вимірювання напруги база-емітер

Для мінімізації цільової функції

$$\Delta \{R\} = \min \max [\delta_1(R4), \delta_2(R5), \delta_3(R7)]$$

потрібно визначити оптимальний вибір номінальних значень параметрів компонентів $R4$, $R5$ та $R7$, аби забезпечити точку спрацювання за температури, наприклад, $170\text{ }^{\circ}\text{C}$ з найменшим відхиленням максимальних компонентів з $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ від цієї точки.

В основі роботи цієї схеми покладено залежність напруги переходу база-емітер $VSENS$ кремнієвого біполярного транзистора $VT0$ від температури при стабільному струмі $ISTEP$ у схемі вимірювання, рисунок 3. Відповідно до цього задача оптимізації може бути конкретизована за наступним алгоритмом:

1. Створити узагальнену термометричну характеристику ПСТ з урахуванням розсіяння напруги база-емітер транзистора-датчика температури в межах технологічного процесу.

2. Знайти локальний оптимум «0» – за усередненою моделлю термометричної характеристики за умови середніх значень коефіцієнта підсилення n - p - n транзисторів.

3. Знайти локальний оптимум «1» – за усередненою моделлю термометричної характеристики та умови межового відхилення значення коефіцієнта підсилення n - p - n транзисторів в додатню область допуску.

4. Знайти локальний оптимум «2» – за усередненою моделлю термометричної характеристики та умови відхилення значення коефіцієнта підсилення n - p - n транзисторів у від'ємну область допуску.

5. За результатами досліджень за п. 1–4 визначити умови продовження дослідження, наприклад, за умови усереднених значень коефіцієнтів підсилення транзисторів і.

6. Знайти локальний оптимум «3» – за умови межового відхилення значення напруги U_{ce} у додатню область.

7. Знайти локальний оптимум «4» – за умови межового відхилення значення напруги U_{ce} у від'ємну область.

8. Обрахувати глобальний оптимум як усереднення локальних оптимумів.

9. Провести перевірку «0» температури спрацювання ПСТ глобального оптимуму на потрапляння у допуск за серединним значенням U_{ce} та значеннями опорів резисторів у глобальному оптимумі.

10. Провести перевірку «1» – за умови межового відхилення напруги U_{ce} у додатню область та значеннями опорів резисторів у глобальному оптимумі.

11. Провести перевірку «2» – за умови межового відхилення напруги U_{ce} у від'ємну область та значеннями опорів резисторів у глобальному оптимумі.

12. Провести перевірку «3» – за умови межового відхилення напруги U_{ce} у додатню область та межових відхилень опорів резисторів у додатню область.

13. Провести перевірку «4» – за умови межового відхилення напруги U_{ce} у від'ємну область та межових відхилень опорів резисторів у додатню область.

14. Провести перевірку «5» – за умови межового відхилення напруги U_{ce} у додатню область та межових відхилень опорів резисторів у від'ємну область.

15. Провести перевірку «6» – за умови межового відхилення напруги U_{ce} у від'ємну область та

межових відхилень опорів резисторів у від'ємну область.

16. Якщо результати перевірки прийнятні, то обрахувати усереднене (типове) значення температури спрацювання ПСТ і завершити задачу, інакше внести зміни та перейти до п. 1.

Постає питання, які зміни можливі, коли виявлені порушення в контролі на інтервали допуску? Відповідь не однозначна і залежить від того, в якій мірі порушені обмеження. Відповідно рішення можуть бути і такими, що потребують узгоджень з експертами:

1) Визначити більший ваговий коефіцієнт для вектора змінних найгіршого випадку, провести перерахування вектора змінних для глобального оптимуму. За необхідності повторити цикл оптимізації.

2) Визначити критичний елемент та перевести його в категорію з вужчим допуском. Це може бути виконання резистора більш точним, але через це і більш габаритним.

3) Погодитись на певний відсоток виходу за межі допуску, визначити ознаки ризику порушень та перевести ці вироби в категорію з нижчими цінами. Наприклад з категорії військового стандарту до категорії промислового чи навіть побутового стандарту.

4) В складній ситуації перевести надкритичний елемент в розряд «тюнінг» – налаштування. Операція налаштування вартісна та уповільнює процес виготовлення. Тому вона не бажана і потребує експертної оцінки.

5) Змінити схему моделі. Радикальний і надзвичайний крок, інколи потребує експертної оцінки.

Створення узагальненої термометричної характеристики ПСТ з урахуванням розсіяння напруги база-емітер транзистора-датчика температури в межах технологічного процесу передбачає в даному разі визначення такого струму через сенсор та напруги переходу база-емітер за цим струмом, що вони визначають усереднену термометричну характеристику за середніми значеннями коефіцієнта підсилення транзистора, що відіграє роль сенсора. В схемі, рисунок 2, роль сенсора відіграє транзистор $VT2$. За початковим дослідженням [8] струм через транзистор в точці спрацювання складає 55 мкА. Це значення струму для транзистора $VT2$ покладено для вимірювання напруги U_{ce} за схемою вимірювання, рисунок 3, $I_{\text{STEP}} = 55$ мкА для виявлення середнього значення відхилень цього параметру. Усереднені результати цих вимірювань за моніторингом, що

охоплює 14 місяців, склали усереднену термометричну характеристику ІПТС.

Пошук локального оптимуму «0» – за усередненою моделлю термометричної характеристики за умови середніх значень коефіцієнта підсилення p-p транзисторів проводився, як і в інших випадках, за методом Хука-Джівса. Алгоритм пошуку оптимального рішення в цьому випадку полягає в тому, що допустимі значення компонентів можуть приймати лише значення в рамках того інтервалу, що визначений як межа допуску на виготовлення за чинним технологічним процесом. Доцільність такого підходу полягає в тому, що цим враховуються обмеження на параметри компонентів з урахуванням конструктивно-топологічних обмежень технологічного процесу виготовлення зразків ІПТС. Водночас зменшується яружність цільової функції порівняно з тим, якби обмеження формулювались за допомогою нелінійних функцій на межах допустимих значень змінних оптимізації.

Щодо відхилень напруги $U_{\text{бс}}$. Для усталеного технологічного процесу середнє відхилення складає 1,5...2 мВ. Водночас в межах кристала може спостерігатись відхилення напруги $U_{\text{бс}}$ до ± 3 мВ. Такі флуктуації напруги $U_{\text{бс}}$ зазвичай нейтралізують, наприклад, виконанням відповідальних елементів у вигляді матриці. Але ретельне дослідження цього питання не входить в задачу даної роботи.

Результат пошуку локального оптимуму «0» за середнього значення напруги $U_{\text{бс}} = 661,8$ мВ, що відповідає усередненій термометричній характеристиці, відображає рисунок 4. Діаграму струму в області спрацювання наведена на верхньому графіку. Нижній графік відображає напругу на виході ІПТС. Вектор змінних оптимізації в точці локального оптимуму «0» складає

$$\{R4=5,6 \text{ кОм}, R5= 4,23 \text{ кОм}, R7=363 \text{ Ом}\}$$

Таким чином пункти 1–2 алгоритму виконано.

Дослідження за пунктами 3–4 алгоритму показало, що спрацювання ІПТС в локальному оптимумі «1» та «2» при відхиленні значення коефіцієнта підсилення p-p транзисторів у від'ємну чи додатну область допуску істотно не відрізняються від наведеного на рисунку 4 локального оптимуму «0». Тому надалі дослідження проводяться лише з середніми значеннями коефіцієнтів підсилення транзистора.

Виконання пункту 6 алгоритму «Знайти локальний оптимум «3» за умови межового відхилення значення напруги $\Delta U_{\text{бс}}$ у додатну область» до значення $U_{\text{бс}} = 663,8$ мВ надає наступні значення вектора змінних оптимізації:

$$\{R4=5,54 \text{ кОм}, R5= 4,3 \text{ кОм}, R7=346 \text{ Ом}\},$$

а пункту 7 – наступні:

$$\{R4=5,73 \text{ кОм}, R5= 4,26 \text{ кОм}, R7=346 \text{ Ом}\}.$$

Для виконання п. 8 алгоритму проводимо усереднення компонентів вектора змінних. Для першого проходу циклів оптимізації кожному вектору надаємо однаковий ваговий коефіцієнт 1,00 і отримуємо вектор у вигляді:

$$\{R4=5,6233 \text{ кОм}, R5= 4,26 \text{ кОм}, R7=342 \text{ Ом}\}$$

Вектори резисторів, номінальні значення яких відхилились на 5% у додатну та від'ємну області відповідно мають значення:

$$\{R4=5,9045 \text{ кОм}, R5= 4,4765 \text{ кОм}, R7=359,1 \text{ Ом}\};$$

$$\{R4=5,3421 \text{ кОм}, R5= 4,242 \text{ кОм}, R7=340,3 \text{ Ом}\}.$$

В цьому випадку розрядність компонентів не обмежено трьома знаками, бо в цьому разі вони означають не номінальні значення за топологічним рішенням, а наслідок технологічної реальності отриманих конструкцій.

Результати перевірки зведені в таблицю (табл. 1).

Проведемо оцінку на прийнятність отриманого результату.

Значення температури спрацювання $166,1^\circ\text{C}$ істотно відрізняється від перших трьох результатів. Звичайно, можна застосувати «Рішення 1») з алгоритму та провести повторну оптимізацію зі збільшенням вагового коефіцієнта саме для випадку зменшення напруги база-емітер і відхилень значень резисторів в сторону зменшення. Але, з точки зору експертної оцінки похибка становить 2,3%, що прийнятно. Крім того, така величина спрацювання при від'ємному відхиленні значень резисторів позитивно вплине на захист потужного транзистора. Особливість такої ситуації полягає в тому, що зазвичай кожну комірку матриці потужного транзистора захищають від випадкових флуктуацій напруги $U_{\text{бс}}$ невеликим за опором резистором, що включений послідовно з емітером. У випадку перегріву і неконтрольованого збільшення струму коміркою внаслідок від'ємного зворотного зв'язку за струмом захисний резистор запобігає руйнуванню комірки від перегріву. Отже, при зменшенні опору захисних резисторів, що може ста-

Таблиця 1

Перевірка №	0	1	2	3	4	5	6
Температура спрацювання ІПТС, $^\circ\text{C}$	168,65	170,0	167,35	171,22	168,6	168,7	166,1

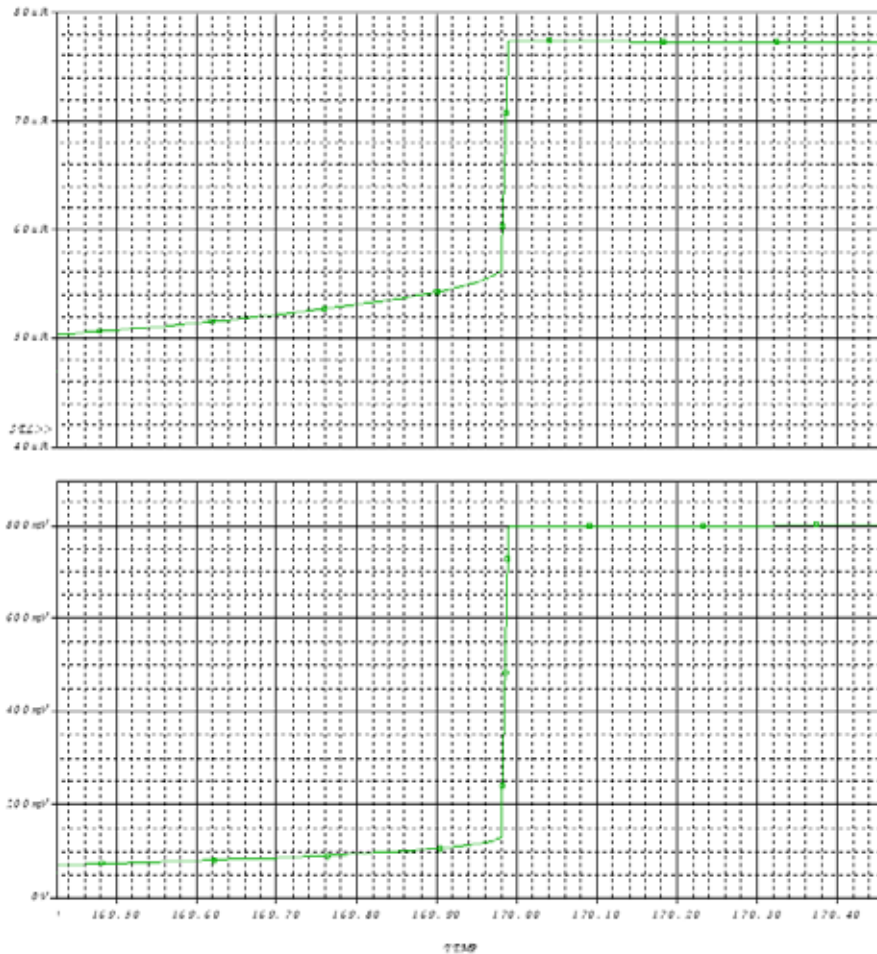


Рис. 4. Діаграма струму та напруги ПСТ

тися в результаті варіації технологічного процесу, бажано зсувати точку спрацювання ПСТ в сторону нижчої температури. В даному разі це виконується без додаткових зусиль. Тому процес оптимізації на цьому можна вважати завершеним.

Висновки.

1. Запропоновано критерій якості інтегрального порогового сенсора температури для оптимізації точки спрацювання (ПСТ).
2. Сформовано цільову функцію на основі змінних оптимізації.

3. Запропоновано визначення глобального оптимуму на основі зважених результатів пошуку локальних оптимумів точки спрацювання ПСТ.

4. Запропоновано алгоритм оптимізації, що включає перевірку результату пошуку глобальної оптимальної точки спрацювання ПСТ з урахуванням відхилень параметрів елементної бази.

5. Проведено експертну оцінку найгіршого випадку результату перевірки та обґрунтовано рішення про завершення оптимізації за першим проходом.

Список літератури:

1. Mordor Intelligence. The Temperature Sensors market -, growth, trends, Covid-19 impact, and forecast (2023 - 2028). - Temperature Sensors Industry Report. URL: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/temperature-sensors-market-industry>
2. Panchangam S.P., Naskan V. N. A. Realleability analysis of temperature. Sensor System. International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering Vol. 20, No. 1 (2013) 1350003 (20 pages) World Scientific Publishing Company. DOI: 10.1142/S0218539313500034
3. IEEE. LabVIEW based modelling and analysis of temperature sensors. 2014 First International Conference on Computational Systems and Communications (ICCSC) Date Added to IEEE Xplore: 16 February 2015. INSPEC Accession Number: 14931729. DOI:10.1109/COMPSC.2014.7032662

4. Jing W., Wang P., Zhang N. Study on Temperature Sensor Data Anomaly Diagnosis Method Based on Deep Neural Network. – Hindawi Scientific Programming. - Volume 2022, Article ID 9662374, 8 pages. <https://doi.org/10.1155/2022/9662374>
5. Design and performance analysis of a novel displacement-based temperature sensor// Hassena M.A.B. Ghommem M. Aly A. Hamdan M. Najar F. From the journal tm - Technisches Messen <https://doi.org/10.1515/teme-2022-0104> (<https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/teme-2022-0104/html>)
6. Han I. Y., Kim S. J. “Diode temperature sensor array for measuring micro-scale surface temperatures with high resolution,” Sens. Actuators A Phys., vol.141, no.1, pp. 52–58, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2007.07.020>
7. Pavlov L.M. Yaganov P.O. Termometric model of diode temperature sensor / KPI Science News,- № 1-2 (2022), 52-68. DOI: <https://doi.org/10.20535/kpissn.2022.1-2.251016>
8. Павлов Л.М. Пороговий сенсор температури. «Світ наукових досліджень. Випуск 15» 19-20 грудня 2022 року, м. Тернопіль (Україна) – м. Переворськ (Польща), <http://www.economy-confer.com.ua/full-article/4125/>

Pavlov L.M., Yaganov P.O. OPTIMIZATION OF THE INTEGRAL TEMPERATURE THRESHOLD SENSOR

The article highlights the optimization of the integrated threshold temperature sensor (IPST), which is designed to protect a critical node - a powerful power transistor of a voltage stabilizer, linear or pulsed. The peculiarity of such a sensor is that its output signal is analog and is formed in the form of a significant voltage drop that enters the control unit of the power element of the integrated microcircuit. The quality of such a sensor is evaluated by the temperature error of the trigger point. The trigger point, in turn, has the initial temperature of the rise of the signal and the temperature of its termination. This is a certain temperature interval in which the IPST output signal is formed. Accordingly, the narrower this interval, the higher the quality of the sensor. Finally, the third factor for assessing the quality of the sensor is the area on the crystal of the integrated microcircuit occupied by the elements of the sensor: the smaller the area, the cheaper the microcircuit, the greater its competitiveness. So, less area means higher quality. These three factors make up the quality criterion in the optimization of the IPST, which are included in the formation of the target function of the optimization process. The objective function is formed according to the minimax optimality criterion, which means the minimum value of the objective function at the maximum of the deviation values of the components of the optimization objective function vector. The weight coefficients of the components of the vector of components of the objective function are selected by the method of expert evaluations. The optimization function is specified by the parameters of the circuit elements of the IPST model: the values of the electrical operating modes of the transistors, their sizes, and the resistance values of the resistors. To find the optimal point of the objective function, an algorithm is proposed, which involves searching for local optimal points and, based on them, obtaining the global optimum by weighted averaging. Checks at the point of the global optimum and solutions in case of violation of the quality criterion are proposed. The algorithm for finding the optimal solution in this case consists in the fact that the allowable values of the components can only take values within the interval defined as the production tolerance limit according to the current technological process. The expediency of this approach is that it takes into account the limitations on the parameters of the components, taking into account the structural and topological limitations of the technological process of manufacturing IPST samples.

Key words: integral threshold temperature sensor; sensor error; optimization, optimization criterion, objective function, optimization variables.

Проконець В.А.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Глоба Л.С.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

МЕТОД МІЖСЕКТОРАЛЬНОГО ПЕРЕРОЗПОДІЛУ КОРИСТУВАЧІВ НА БАЗІ ТЕХНОЛОГІЇ ЦИФРОВОГО ДВІЙНИКА

Стаття присвячена викладу результатів математичного моделювання процесу перерозподілу користувачів між секторами базових станцій, що обслуговують високонавантажену ділянку мережі. Результати моделювання показують, що з використанням методу пошуку за сіткою (grid search) для параметрів потужності випромінювання можна досягнути рівномірного розподілу користувачів між секторами при довільному розподілі користувачів на місцевості. Основними недоліками сучасних підходів, що орієнтуються на задачу оптимізації мереж 4G/5G є концентрація на забезпеченні оптимального покриття та балансування навантаження всередині сектору шляхом рівномірного розподілу наявних частотних та часових ресурсів. У ситуації, коли один з сусідніх секторів є перенавантаженим, а інший має достатньо вільного ресурсу, доцільним є виконання перерозподілу користувачів шляхом зміни території покриття кожного сектору.

Запропонований в статті метод міжсекторального розподілу користувачів базується на використанні технології цифрового двійника (digital twin). Основною метою використання цифрових двійників є досягнення більшого рівня взаємодії фізичних об'єктів (в даному випадку – елементів радіомережі стільникового зв'язку) та їхніх цифрових репрезентацій. Цифрова репрезентація може отримувати від фізичного об'єкта дані щодо його функціонування в режимі реального часу, проводити моделювання та прогнозування на основі отриманих даних. На основі прогнозів може бути прийнято рішення щодо зміни певних параметрів фізичного об'єкта.

Радіомережа стільникового зв'язку, модернізована запропонованим методом, може в автоматичному режимі отримувати рекомендації щодо зміни потужності випромінювання сусідніх секторів високонавантаженої ділянки, що позитивно вплине на показники якості обслуговування.

Напрямою подальших досліджень слід вважати його інтеграцію в комплексну систему цифрового двійника радіомережі стільникового зв'язку та роботу над методом, що дозволить отримати дані щодо щільності розподілу користувачів на місцевості з високою роздільною здатністю. Наявна імплементація методу допускає, що розподіл користувачів всередині сектору є рівномірним.

Ключові слова: математичне моделювання радіомережі, оптимізація радіомережі, ємність мережі, перерозподіл користувачів, цифровий двійник.

Постановка проблеми. Нині планування та оптимізація радіомережі стільникового зв'язку є ключовим етапом розгортання бездротових систем зв'язку, що забезпечують покриття в масштабах цілої країни. В рамках планування необхідно вирішити дві основні задачі: забезпечення максимально можливого покриття та забезпечення необхідної ємності на цій ділянці. Оптимізацію радіомережі можна розділити на два окремих підзавдання: усунення помилок, допущених при плануванні мережі та реакція на еволюцію мережі протягом часу – збільшення кількості користувачів, переміщення значної кількості користувачів в іншу ділянку мережі. Таким чином, актуальним

питанням є можливість автоматичної та адаптивної реконфігурації мережі у відповідь на зміни в мережі, описані вище.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Основним предметом оглядової статті [1] є самоорганізовані мережі – Self-Organized Network (SON). Автори наводять три категорії таких мереж:

- Конфігураційні (self-configuration), призначені для вводу в експлуатацію нового елемента мережі при мінімальному втручанні людини в цей процес;
- Оптимізаційні (self-optimization), що в автономному режимі виконують оптимізацію параметрів системи після початкової само-конфігурації;

- Відновлювальні (self-healing), призначені для зменшення кількості відмов у обслуговуванні шляхом виконання відповідних дій щодо відновлення.

В рамках вирішення проблем визначених в цій статті, доцільним є використання оптимізаційних само-організованих мереж. Серед задач таких мереж в стандарті 3GPP Rel.10 для мереж LTE була визначена оптимізація покриття-ємність – Coverage-Capacity Optimization (CCO). В роботі [2] автори розглядають декілька підходів щодо CCO: [3], [4], [5], [6]. При цьому, [3], [5], [6] зазначають, що основною метою їхніх підходів є оптимізація саме покриття, а зміни ємності фактично є наслідками зміни покриття. Автори [4] фокусуються на оптимізації ємності шляхом зміни електричного куту нахилу антен, проте основним недоліком цього дослідження є визначення проблемних секторів за сумарним об'ємом ресурсів, споживаних користувачами. На нашу думку, цей показник не є найбільш релевантним, оскільки цей ресурс можуть споживати як декілька користувачів так і декілька десятків. У першому випадку зміна куту нахилу антен з великою ймовірністю не принесе покращення. В статті [7] автори визначають можливість оптимізації покриття та ємності шляхом зміни електричного куту нахилу антени, проте, як і в роботах [3], [5], [6] фокусуються на оптимізації покриття. Оптимізація ємності досягається шляхом зменшення загального рівня інтерференцій, що не відповідає проблемі, зазначеній у цій статті.

Постановка завдання. Існуючі методи оптимізації покриття-ємність в технології SON більшою мірою призначені саме для оптимізації покриття та рівня інтерференції між сусідніми секторами. Метод запропонований авторами в [4] найбільше підходить для вирішення задачі перерозподілу користувачів між секторами, проте містить деякі недоліки. Таким чином, вирішити задачу перероз-

поділу користувачів можна з допомогою покращеного методу, базованого на технології цифрового двійника, викладенню якого і присвячена ця стаття.

Вирішення проблеми.

В цьому дослідженні для вирішення задачі пропонується використання технології цифрового двійника, основною метою якої є створення цифрової моделі певного фізичного об'єкту чи процесу, що є інтегрованою з цим самим об'єктом чи процесом двостороннім зв'язком. Рис.1 відображає основні відмінності цифрового двійника від стандартної цифрової моделі.

Таким чином, можна зробити висновок, що цифровий двійник отримує від фізичної системи дані щодо її функціонування, в той час, як цифровий двійник може виконувати керування системою на основі аналізу цих даних та прогнозування стану системи в майбутньому шляхом симуляції.

В контексті планування та оптимізації радіомережі стільникового зв'язку, варто виокремити основні фази, до яких відносять:

- Попереднє планування, в якому визначається загальний вектор розвитку мережі та необхідна кількість обладнання;
- Детальне планування, в якому визначаються конкретні локації розташування базових станцій та їхній початковий набір конфігураційних параметрів;
- Оптимізація, метою якої, як було зазначено вище, є усунення помилок, допущених при плануванні мережі та реакція на еволюцію мережі протягом часу.

В цьому випадку, цифровий двійник є високорівневою імітацією мережі на місцевості, основними елементами якої є:

- Світ (набір тривимірних точок формату довгота-широта-висота над рівнем моря), для яких розглядаються рівень покриття та кількості корис-



Рис. 1. Відмінності цифрового двійника від стандартної цифрової моделі

тувачів. На відміну від статистичного параметру сумарного об'єму ресурсів, споживаних користувачами, що використовується в дослідженні [4], нами запропоновано використовувати параметр загальної кількості користувачів, оскільки він є більш релевантним для задачі перерозподілу користувачів між секторами базової станції.

- Набір базових станцій з відповідними конфігураційними параметрами.

Цифровий двійник замінює собою фазу оптимізації радіомережі, оскільки він виконує функції моніторингу статистичних параметрів функціонування, аналізу цих даних з метою виявлення проблемних секторів, симуляцію можливих рішень, одне з яких є предметом цієї статті, та надання рекомендацій щодо найкращого рішення для кожного проблемного сектору. Інтеграція цифрового двійника в процеси планування та оптимізації радіомережі зображена на рис. 2.

До рішень, що можуть бути рекомендовані цифровим двійником відносяться:

- Виділення неактивного ресурсу. У випадку використання обмеженого частотного ресурсу (активні не всі несучі / ресурсні блоки) можна його розширити до максимально можливого;

- **Зміна розподілу користувачів між сусідніми секторами.** З цією метою Цифровий двійник може виконувати поетапну зміну параметрів мережі (такі як потужність випромінювання та електричний кут нахилу антен) та проводити симуляцію розподілу користувачів при новому покритті. Така зміна доцільна у випадку, коли один сектор є перенавантаженою, а сусідній – недонавантаженою. Основною задачею є рівномірний розподіл користувачів між сусідніми секторами;

- Інсталяція багатопромених антен;
- Будівництво нової базової станції.

Основою відмінністю нового методу міжсекторального перерозподілу користувачів є те, що він є складовою цифрового двійника радіомережі. Це означає, що він може використовувати статистичні показники функціонування радіомережі як вхідні дані в режимі реального часу, а також основні елементи цифрового двійника описані вище: світ та набір базових станцій з їхніми конфігураціями.

Маємо зону високого навантаження та множини секторів базових станцій, що її обслуговують. Визначимо значення кількості користувачів в секторі, актуальні параметри потужності та електричного куту нахилу антен та площі покриття як:

$$X = (x_i), P = (p_i), A = (a_i), S = (s_i), I = \overline{1, n}$$

де n – кількість сусідніх секторів в зоні високого навантаження.

Визначимо множину допустимих значень потужності випромінювання та допустимих значень куту нахилу антен:

$$PP = (pp_j), J = \overline{1, m} \quad AP = (ap_y), Y = \overline{1, k}$$

де m, k – кількість допустимих значень потужності випромінювання та куту нахилу антен відповідно.

Таким чином, необхідно знайти значення потужності випромінювання та куту нахилу антен всіх сусідніх секторів в зоні високого навантаження, що забезпечать рівномірний розподіл користувачів між секторами:

$$(p_i, a_i), \forall i \in I, \sum_{\substack{0 \leq j \leq n \\ 0 < j < n}} \frac{s_{ji}}{s_i} * x_i \approx \frac{\sum x}{n}$$

де s_i – площа покриття сектору i , s_{ij} – площа пересічення покриття реконфігурованого сектору j з оригінальним покриттям сектору i .

Імплементація запропонованого методу створена у вигляді програми Python. Програма містить два основні класи:



Рис. 2. Інтеграція цифрового двійника радіомережі в процеси планування та оптимізації

- World – визначає основний елемент «Світ» цифрового двійника радіомережі. Містить набір тривимірних точок у просторі з дискретизацією 5м. Функція, що реалізує запропонований у статті метод є складовою частиною цього класу;

- Transmitter – визначає об’єкти основного елементу «Набір базових станцій» цифрового двійника радіомережі. Містить набір конфігураційних параметрів базової станції, а також функції розрахунку втрат на трасі (path loss) та рівня отриманого сигналу в будь-якій точці простору від конкретної базової станції. Також створений інтерфейс, що дозволяє зберігати статистичні дані функціонування, що спростить інтеграцію методу з реальною мережею.

Програма має наступні допущення та обмеження:

- Розрахунок покриття може відбуватися лише в точках, визначених в класі World;

- Відповідно, покриття кожної базової станції визначається множиною точок, що їй належить;

- В цьому дослідженні розподіл користувачів всередині множини точок, що належать базовій станції вважається рівномірним. Наприклад, якщо внаслідок реконфігурації 10% покриття базової станції 1 (BC-1) перейшло до базової станції 2 (BC-2), то, відповідно, 10% користувачів також перейшло від BC-1 до BC-2.

- Втрати на трасі попередньо розраховані та збережені в форматі JSON для всіх можливих значень параметрів типу місцевості (сільська, міська), наявності прямої видимості, частоти, висоти базової станції, відстані до базової станції. Всі розрахунки виконані згідно специфікації 3GPP TR 38.901 version 16.1.0 Release 16 [8]. При розрахунку покриття зчитується відповідне значення втрат на трасі замість окремого розрахунку, що дозволило пришвидшити розрахунок покриття однієї базової станції в 23 рази (з 2,3с до 0,1с). В рамках функціонування цифрового двій-

нику дане рішення є важливим, оскільки дозволяє виконувати розрахунки в режимі реального часу з мінімальними затримками.

Для перевірки запропонованого методу було проведено математичне моделювання простого запропонованого методу для цифрового двійника, що складається з плоского світу (для всіх точок висота над рівнем моря складає 0 м) та двох секторів, що знаходяться на відстані 6 км та направлені один навпроти іншого. При цьому в секторі 1 знаходяться 60 користувачів, а в секторі 2 – 20. Програма виконує поетапну симуляцію із зміною потужності випромінювання кожної базової станції за стратегією пошуку по сітці. При цьому, автоматично визначається напрям переходу користувачів від більш навантаженого сектору. Діапазон зміни потужності складає (-1 дБ...-5 дБ) для більш навантаженого сектору та (1 дБ ... 5 дБ) для менш навантаженого з кроком 1 дБ. У зв’язку з малою кількістю можливих комбінацій та значною швидкістю розрахунків, використання алгоритмів штучного інтелекту є недоцільним на даному етапі.

Для даного прикладу найкращою комбінацією буде зменшення потужності на 2 дБ для сектору 1 та збільшення на 1 дБ потужності випромінювання сектору 2. При цьому, очікувані значення кількості користувачів складатимуть 39.84 та 40.16 для секторів 1 та 2 відповідно. Зміна розподілу покриття відображена на рис. 3. Зміна рівню отриманого сигналу відображена на рис. 4.

Висновки.

1. У статті запропоновано метод міжсекторального розподілу користувачів на базі технології цифрового двійника, що дозволяє рівномірно розподілити користувачів між сусідніми секторами, що обслуговують високонавантаженою ділянкою мережі. Основною відмінністю від існуючих методів є фокус на показнику кількості користувачів та врахуванні унікального для кожного

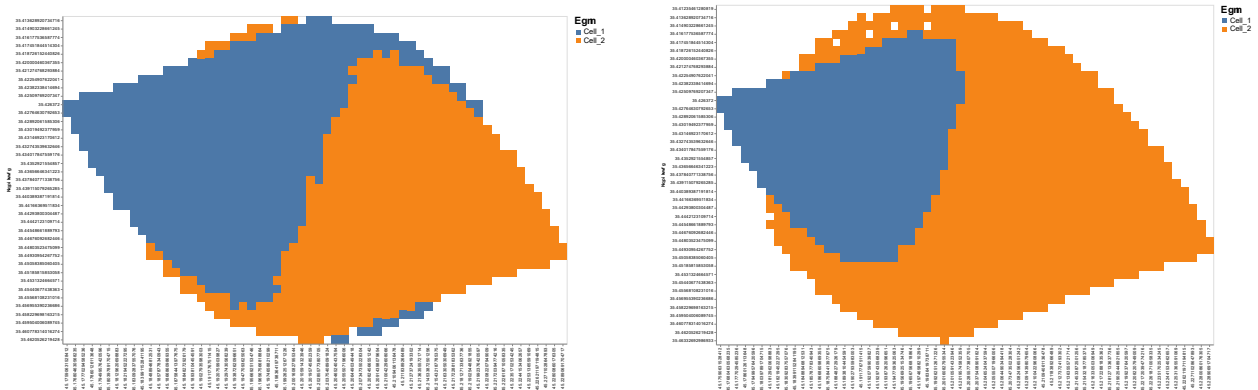


Рис. 3. Зміна покриття секторів 1 (синій колір) та 2 (помаранчевий колір) внаслідок реконфігурації секторів за параметрами, що були запропоновані новим методом міжсекторального перерозподілу користувачів

сектору базової станції розподілу користувачів. На даному етапі такий розподіл вважається рівномірним.

2. Проведено математичне моделювання простого цифрового двійника радіомережі стільникового зв'язку, що містить імплементацію запропонованого методу. Результати моделювання показують, що метод має високу ефективність рівномірного розподілу користувачів між сусідніми секторами. При цьому, використання набору

географічних точок з прив'язаною кількістю користувачів дозволяє використовувати метод для довільного розподілу користувачів.

3. Напрямом подальших досліджень слід вважати його інтеграцію в комплексну систему цифрового двійника радіомережі стільникового зв'язку та роботу над методом, що дозволить отримати дані щодо щільності розподілу користувачів на місцевості з високою роздільною здатністю.

Список літератури:

1. Hasna Fourati, Rihab Maaloul, Lamia Chaari, Mohamed Jmaiel, Comprehensive survey on self-organizing cellular network approaches applied to 5G networks, *Computer Networks*, Volume 199, 2021, 108435, ISSN 1389-1286 <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2021.108435>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389128621003960>)
2. Jessica Moysen, Lorenza Giupponi, From 4G to 5G: Self-organized network management meets machine learning, *Computer Communications*, Volume 129, 2018, Pages 248-268, ISSN 0140-3664, <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2018.07.015>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140366418300380>)
3. Sengul, Cigdem. (2014). Self-optimization of coverage and capacity based on a fuzzy neural network with cooperative reinforcement learning. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*.
4. S. Klein, I. Karla and E. Kuhn, "Potential of INTRA-LTE, Intra-Frequency Load Balancing," 2011 IEEE 73rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring), Budapest, Hungary, 2011, pp. 1-5, doi: 10.1109/VETECS.2011.5956281.
5. Li, Jingyu & Zeng, Jie & Su, Xin & Luo, Wei & Wang, Jing. (2012). Self-Optimization of Coverage and Capacity in LTE Networks Based on Central Control and Decentralized Fuzzy Q-Learning. *International Journal of Distributed Sensor Networks*. 2012. 10.1155/2012/878595.
6. C. Yanyun, H. Alexis, X. Hui and Y. Xingxiu, "Coverage and Capacity Optimization for 4G LTE Networks Using Differential Evolution," 2018 5th IEEE International Conference on Cloud Computing and Intelligence Systems (CCIS), Nanjing, China, 2018, pp. 640-645, doi: 10.1109/CCIS.2018.8691195.
7. Dandanov, Nikolay & Al-Shatri, Hussein & Klein, Anja & Poulkov, Vladimir. (2017). Dynamic Self-Optimization of the Antenna Tilt for Best Trade-off Between Coverage and Capacity in Mobile Networks. *Wireless Personal Communications*. 92. 10.1007/s11277-016-3849-9.
8. Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz (3GPP TR 38.901 version 16.1.0 Release 16). https://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/138900_138999/138901/16.01.00_60/tr_138901v160100p.pdf

Prokopets V.A., Globa L.S. METHOD OF INTERSECTORAL REDISTRIBUTION OF USERS BASED ON DIGITAL TWIN TECHNOLOGY

The article is devoted to presenting the results of mathematical modeling of the process of redistribution of users between sectors of base stations serving a highly loaded section of the network. The simulation results show that using the grid search method for radiation power parameters makes it possible to achieve an even distribution of users between sectors with an arbitrary distribution of users on the terrain. The main disadvantages of modern approaches focused on optimizing 4G/5G networks are the concentration on ensuring optimal coverage and balancing the load within the sector through the uniform distribution of available frequency and time resources. When one of the adjacent sectors is overloaded and the other has enough free resources, it is reasonable to redistribute users by changing the coverage areas of each sector. The method of intersectoral distribution of users proposed in the article is based on digital twin technology. The primary purpose of using digital twin is to achieve a higher level of interaction between physical objects (in this case - elements of the cellular radio network) and their digital representations. Digital representation can receive data from a physical object regarding its functioning in real-time and conduct modeling and forecasting based on the received data. Based on forecasts, a decision can be made to change specific parameters of a physical object.

Modernized by the proposed method, the cellular radio network can automatically receive recommendations for changing the radiation power of neighboring sectors of a highly loaded area, which will positively affect service quality indicators.

The direction of further research should be its integration into a complex system of a digital twin of the cellular radio network and work on a method that will allow obtaining data on the density of the distribution of users in the area with high resolution. The existing implementation of the method assumes that the distribution of users within the sector is uniform.

Key words: *mathematical modeling of the radio network, optimization of the radio network, network capacity, redistribution of users, digital twin.*

Сайко В.Г.

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

Наритник Т.М.

Інститут електроніки та зв'язку Української академії наук

ЗАСТОСУВАННЯ БЛОКЧЕЙН СИСТЕМИ ДЛЯ БЕЗПЕЧНОГО ОБМІНУ ПОВІДОМЛЕНЬ В ГЕТЕРОГЕННИХ МОБІЛЬНИХ МЕРЕЖАХ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДІАПАЗОНУ

Наведено рекомендаційні аспекти щодо впровадження блокчейн рішення в одну з перспективних послуг мереж нового покоління, таку як забезпечення подолання ефектів блокування передачі в мобільних системах при застосуванні терагерцового діапазону довжин хвиль. Представлене рішення дозволяє підвищити конфіденційність і надійність переданих даних, забезпечити появу нових можливостей щодо прийняття рішень і знизити затримки та підвищити енергоефективність. Запропоновано інноваційний тип блокчейн, який можна використовувати для ефективної перевірки надійності вузлів та повідомлень про події мікросервісу забезпечення подолання ефектів блокування передачі в мобільних системах при застосуванні терагерцового діапазону довжин хвиль. Основними його особливостями є: нова інфраструктура блокчейна для зберігання достовірності вузлів та повідомлень у мобільній мережі 5G. У цій структурі достовірність вузла та повідомлення, які діють як транзакції, подібні до блокчейну Біткойн. Але при цьому маємо справу з повідомленнями про події як із транзакціями, а не з криптовалютою. Для зменшення затримки при генерації блоків, застосовуються граничні обчислення в блокчейн. Прикордонні обчислення зменшують затримку за рахунок перенесення складних обчислень на прикордонні пристрої. На основі нової структури блокчейну наведено розроблений загальний алгоритм адаптивного функціонування абонента при блокуванні передачі прямої видимості в гетерогенній мобільній мережі терагерцового діапазону. Застосування запропонованого рішення в децентралізованій мережі мобільного зв'язку 5G, основою якої є інфраструктура блокчейн, потенційно знижує складність мережі, значно зменшує експлуатаційні витрати оператора і відповідно підвищує надійність та оперативність управління механізмом адаптивного забезпечення абоненту зв'язком в режимі реального при блокуванні передачі прямої видимості.

Ключові слова: блокчейн, мобільний зв'язок, терагерцового діапазону, блокування передачі.

Постановка проблеми. У сучасних мобільних мережах під час передачі обслуговування (хендовера) користувачького обладнання об'єкт управління мобільністю повинен використовувати контекстну інформацію обладнання. Ця подія запускає послідовну взаємодію та передачу сигналів між кількома об'єктами керування мобільністю та сеансом. У гетерогенній мережі при використанні терагерцового діапазону хвиль цей спосіб є мало ефективний, особливо при частих подіях передачі обслуговування при блокуванні передачі в терагерцовому діапазоні. Тому автори запропонували для вирішення такої задачі використати технологію розподіленого реєстру для реалізації механізму попереджувачого хендоверу при блокуванні передачі в терагерцовому діапазоні [1, 2].

Але при реалізації даного рішення необхідно враховувати наступне.

Основними причинами проблем, пов'язаних з інформаційною безпекою гетерогенних мереж терагерцового діапазону, є:

- можливість прослуховування каналів та підміни повідомлень, яка обумовлена загальнодоступністю середовища передачі;
- необхідність використання складних алгоритмів маршрутизації, які враховують ймовірність отримання невірної інформації від скомпрометованих мобільних терміналів унаслідок змін топології мережі;
- неможливість реалізації традиційної безпекової політики обумовлена особливостями класичної архітектури терагерцової мережі, такими як відсутність фіксованої топології та центральних вузлів.

При спілкуванні у мережі з підтримкою реконфігурованих інтелектуальних поверхонь (РІП) з об'єктами мобільної інфраструктури передається

різна інформація, зокрема ідентифікаційні дані РІП, місцезнаходження, зміст запиту та інші. У разі порушення конфіденційності та цілісності таких даних можуть постраждати користувачі. Така інтелектуальна система включає величезну кількість динамічних критично важливих даних в реальному часі, тому її безпека є серйозною проблемою. Через гостру необхідність забезпечення незмінності та цілісності даних пропонується використовувати спеціальні механізми, які доступні у рішеннях блокчейн.

Критичними проблемами при впровадженні блокчейн технології в *мобільні мережі з підтримкою РІП при використанні терагерцового діапазону хвиль* є: низькі обчислювальні ресурси, обмежений обсяг пам'яті та енергії на мобільних засобах, часта зміна їх місцезнаходження у просторі та обмежені ресурси зв'язку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В [3] автори використали базову концепцію блокчейна для спрощення управління розподіленими ключами у різноманітних корпоративних мережах. Автори в [4] об'єднали концепції додатків на основі блокчейну мережі VANET та Ethereum і створили прозору та децентралізовану систему. Вони використовували систему смарт-контрактів Ethereum для запуску всіх типів програм на блокчейні Ethereum. Навпаки, запропонована нами робота застосовує інший тип блокчейну для безпечного розповсюдження повідомлень в гетерогенних мережах при використанні терагерцового діапазону хвиль. У [5] запропоновано технологію блокчейн для безпеки з використанням оверлейної мережі. Вузли оверлейної мережі згруповані у виді кластерів, і ці кластери відповідають за обробку блокчейна та виконання його основних функцій. Однак, введення додаткових вузлів оверлея приводить до високої затримки і може стати центральною точкою відмови, якщо головна частина кластера буде скомпрометована.

Постановка завдання. Розробка принципів технічної реалізації нової інноваційної послуги мереж 5-го та наступних поколінь – використання ресурсу локального кластеру мережевої інфраструктури терагерцового діапазону на базі РІП для забезпечення надійності зв'язку на основі розподіленого реєстру для механізму попереджувального хендверу при блокуванні каналу прямої видимості перешкодами при передачі на край високих частотах.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Загальні зауваження та пропозиції

Застосування блокчейна для надійної передачі інформації є важливим при передачі та уникненні

втрат або спотворень, які можуть спричинити негативні наслідки. Завдяки конструкції системи довірчого керування в блокчейні її можна успішно застосовувати між вузлами (мобільними терміналами) з децентралізованими системами. При цьому «шкідливі» мобільні термінали можуть проникати в мережу та поширювати неправдиву інформацію, що призводить до збою в роботі гетерогенної мобільної мережі з підтримкою РІП. Але застосування блокчейну для оцінки рейтингу учасника мобільної мережі при використанні терагерцового діапазону хвиль також є ефективним рішенням для використання в такій інтелектуальній системі, оскільки рейтингова оцінка об'єкта дозволить застосовувати заходи до порушників та заохочувати порядних користувачів. Це дозволить забезпечити зниження кількості повідомлень неправильної поведінки, що створюють ризик або знижують ефективність роботи самої систем.

Використання алгоритмів з довірчого управління та поділу пріоритетів дозволяє учасникам мобільної мережі з підтримкою РІП при використанні терагерцового діапазону хвиль визначати з високою ймовірністю, чи отримане повідомлення є надійним. Так для об'єктів з високим рейтингом репутації інформація буде прийнята швидше, так як якість даних залежить від репутації об'єкта. Значення довіри до учасників мережі визначається на основі оцінок, отриманих в результаті минулої поведінки, які прикріплюються та зберігаються в системі за допомогою блокчейн технології. Даний метод дозволить об'єктивніше сприймати реальну обстановку, стимулювати користувачів на порядну поведінку та послідовно записувати події для подальшої обробки та використання.

Для організації цього процесу пропонується застосовувати блокчейн з удосконалений алгоритмом консенсусу Practical Byzantine Fault Tolerance [6-8], який відповідає за ефективну роботу в асинхронних мережах, дозволяє досягти консенсусу, навіть якщо деякі вузли мережі не відповідають або дають неправильну інформацію. Даний алгоритм передбачає вибір 2 видів вузлів – лідера та резервних вузлів. Кожен вузол у мережі підтримує свій власний внутрішній стан, і коли він отримує повідомлення, він виконує обчислення та готує рішення про нове отримане повідомлення. Індивідуальне рішення кожного вузла надсилається лідеру вузлів, який підтверджує довіру до нового повідомлення на основі рішень усіх вузлів. Лідером пропонується використовувати технології граничних обчислень, тоді як резервні вузли – учасників мобільної мережі з підтримкою РІП при

використанні терагерцового діапазону хвиль, підключені до інтелектуальної системи управління.

При передачі інформації пристрій мережі формує повідомлення у вигляді транзакції, записуючи в нього значення рейтингу репутації і пріоритет ситуації. Транзакції записуються до блоку та передаються всім учасникам мережі. Чим вище репутація та пріоритет повідомлення, тим швидше приймається рішення про його прийняття. Блок фіксується, коли більше 2/3 валідаторів попередньо фіксують один і той же блок в тому самому раунді для транзакцій. Якщо повідомлення є компрометуючим або невірним, поведінка відправника повідомлення потім передається в блокчейн і повідомляється довірчому органу. Таким чином репутація відправника повідомлення погіршується.

Більшість сучасних блокчейн-систем є архітектурою єдиного ланцюжка. Таким чином, кожен вузол повинен виконувати безліч дубльованих обчислювальних завдань, що призводить до втрати енергії. Крім того, зниження його продуктивності стає очевиднішим, якщо виникають піки трафіку [6].

У випадку запропонованого рішення немає необхідності ділитися блоками за межі зони обслуговування окремого РІП. Для вирішення проблеми масштабованості пропонується архітектура використовує підхід сегментування. Сегментування – це поділ робочого навантаження блокчейн-мережі по одноранговій мережі, щоб кожен вузол не відповідав за транзакційне навантаження всієї мережі [7,8]. Це дозволяє різним сегментам паралельно обробляти транзакції для збільшення пропускної спроможності, що прискорює процеси валідації, а також перевірки блоків у ситуаціях, що залежать від часу, зберігаючи при цьому сумісність. Відповідно до високої мобільності вузлів незалежних підмереж, різні підмережі можуть мати різну кількість вузлів та час генерації блоків.

Удосконалена модель блокчейна для безпечного обміну повідомлень

Для реалізації запропонованого принципу функціонування мережі пропонується удосконалений тип блокчейна для вирішення проблем, пов'язаних із довірчим розповсюдженням повідомлень гетерогенної мобільної мережі при використанні терагерцового діапазону частот. Цей підхід є новим, оскільки використовується концепція незмінної розподіленої загальнодоступної бази даних для безпечного розповсюдження повідомлень у бездротовій мережі, де будь-який вузол може отримати доступ до інформації. Це стало можливим завдяки впровадженню блокчейну Біткойн. Проте

наша проблематика відрізняється від Біткойна, оскільки маємо справу з повідомленнями про події, а не з криптовалютними транзакціями.

Компонентами запропонованої інфраструктури блокчейна є наступні:

– базові станції, які використовуються для зв'язку в зоні обслуговування, та відповідають за автентифікацію та надання сертифіката місцезнаходження мобільних терміналів у межах локального кластера.

– Fog-термінали є основними елементами системи блокчейна у зоні обслуговування локального кластера. Вони генерують повідомлення про події, добувають нові блоки та зберігають повідомлення про події у блокчейні після перевірки. Існує два типи Fog-терміналів, тобто повний вузол та нормальний вузол. Повний вузол має високий рівень довіри та потужну обчислювальну потужність, яка відповідає за видобуток блоків. А інші вузли є звичайними вузлами, які допомагають у генерації повідомлень під час блокування передачі в мобільних системах, а також у пересиланні та перевірці отриманих повідомлень.

– Повідомлення у зоні локального кластера. У зоні обслуговування локального кластера є два типи повідомлень. Це повідомлення маяка та повідомлення про події, які пов'язані з сервісом для забезпечення подолання ефектів блокування передачі в мобільних системах при застосуванні терагерцового діапазону довжин хвиль. Повідомлення маяка періодично передаються для інформування сусідніх Fog-терміналів про стан робочого напрямку зв'язку та положення Fog-терміналів для забезпечення спільної поінформованості інших Fog-терміналів у локальному кластері для управління процесом обслуговування. Повідомлення про події блокування передачі в мобільних системах надсилаються, коли в локальному кластері відбуваються критичні події. Залежно від серйозності надзвичайної ситуації повідомлення про події поділяються на різні рівні залежно від пріоритету, наприклад, рівень 1, рівень 2 та рівень 3, де рівень 1 вказує на повідомлення про вкрай важливі події з найвищим пріоритетом тощо. Ми розглядаємо повідомлення безпеки лише як транзакції у блокчейні, тому що вони відіграють важливу роль у забезпеченні надійності зв'язку. Оскільки повідомлення маяка часто передаються у широкомовному режимі, вони несуть накладні витрати, і такі повідомлення маяка підписується та автентифікується.

– Блоки. Блок складається із заголовка блоку та тіла блоку. Заголовок блоку складається з хеша

попереднього блоку, одноразового номера, мітки часу та кореня Меркла. Тіло блоку складається зі списку повідомлень про події безпеки, які поводяться як транзакції у тілі блоку.

– Сертифікат місцезнаходження, заснований на методі визначення місцезнаходження (Proof of Location, PoL) [9] та використовується для підтвердження розташування Fog-терміналів в локальному кластері. Кожен Fog-термінал вимагає, щоб алгоритм PoL упевнився, що Fog-термінал знаходиться поряд з активним Fog-терміналом. Крім того, дані алгоритму PoL використовується як підтвердження місцезнаходження в повідомленні про подію для блокчейна. БС виступає як валідатор для надання сертифіката місцезнаходження Fog-терміналам в межах зони локального кластера. При цьому всі Fog-термінали та БС мають свої власні пари відкритих та закритих ключів. Запитуючий Fog-термінал відправляє ініціююче повідомлення зі своїм відкритим ключем в БС, а потім БС відправляє випадковий ідентифікатор сеансу Fog-терміналу. БС перевіряє справжність підпису з відкритим ключем Fog-терміналу і перевіряє час для обміну ідентифікатором сеансу. Якщо різниця в часі між відправкою та отриманням ідентифікатора сеансу менше кількох мілісекунд, БС публікує сертифікат розташування, який включає місце місцезнаходження, час і відкритий ключ Fog-терміналу, який підписаний закритим ключем БС. Дані системи GPS не можна використовувати, тому що їх легко підробити. Алгоритм PoL є безпечним, оскільки Fog-термінали не можуть створити підроблений сертифікат місцезнаходження без дійсного підпису БС. Однак використання тільки даних алгоритму PoL не гарантує достовірності повідомлень, тому нам потрібен механізм блокчейну, щоб зробити повідомлення більш надійним.

Сертифікат на використання послуги мікросервісу для забезпечення подолання ефектів блокування передачі в мобільних системах при застосуванні терагерцового діапазону довжин хвиль, який формується заздалегідь блокчейному і передається абоненту після завершення процедур оформлення запиту на встановлення сеансу зв'язку.

Запропонована структура блокчейна для безпечного розповсюдження повідомлень працює наступним чином.

Всі Fog-термінали локального кластера в мережі завантажують та оновлюють блокчейн. Інфраструктура блокчейн діє як розподілена загальнодоступна книга, в якій зберігається повна історія рівнів довіри Fog-терміналів у блокчейні разом

із повідомленнями про події. Fog-термінали, що стикається з «критичною» подією, такою як блокування передачі, будуть передавати повідомлення про подію з кількома параметрами сусіднім Fog-терміналам локального кластера мережі блокчейна. Ці термінали функціонують в режимі моніторингу робочого стану лінії зв'язку абонента, який знаходиться в режимі ведення зв'язку. Коли інші Fog-термінали отримують нове повідомлення про подію, вони спочатку його перевіряють на предмет відповідності зазначеної області знаходження. Потім сусідні Fog-термінали перевіряють інші параметри повідомлення про подію. Кожен Fog-термінал незалежно перевіряє кожне повідомлення про подію, перш ніж поширювати її далі, щоб запобігти розсилці спаму, відмову в обслуговуванні та інші неприємні атаки на систему.

Щоразу, коли відбуваються події, прилеглі Fog-термінали транслюватимуть повідомлення про подію. Сусідні Fog-термінали будуть збирати інформацію від транслюючих Fog-терміналів. Повідомлення про подію містить всю пов'язану інформацію, таку як тип події, псевдоідентифікатор, ідентифікатор події, рівень довіри, величина потужності сигналу захоплення в довільній точці радіуса дії локального кластера, позначку часу, дані алгоритму PoL тощо. Fog-термінали, які отримують повідомлення про подію, спочатку перевіряють рівень довіри Fog-терміналу – відправника у блокчейні, а потім перевіряють повідомлення про подію. Вони перевіряють кожне повідомлення про подію на основі доказів, що стосуються рівня довіри відправляючого Fog-терміналу, місця розташування події, ідентифікатора події, дані алгоритму PoL, позначки часу і т. д., і зберігають повідомлення в локальному пулі пам'яті, якщо повідомлення вважається заслугове на довіру. В іншому випадку, повідомлення відкидається. Повідомлення про подію транслюється в локальній мережі блокчейну, і кожен Fog-термінал у мережі підтверджує повідомлення про подію. Fog-пристрої для майнінгу збирають різні повідомлення про події з пула непідтверджених повідомлень про події та перевіряють правильність параметрів прийнятих повідомлень. Пристрої майнінгу використовують політики перевірки повідомлень, щоб дізнатися достовірність повідомлення. Якщо отримане повідомлення про подію є дійсним і заслугове на довіру на основі політики перевірки, то її рівень довіри буде оновлений. Рівень довіри окреслюється як частка справжніх повідомлень про події m , відправлених Fog-терміналом, до загальної кількості повідо-

млень про події $m+n$, де n – кількість хибних повідомлень про події. Рівень довіри змінюється згодом, залежно від дійсних чи хибних повідомлень. Рівень довіри до Fog-терміналу збільшується зі збільшенням кількості правдивих повідомлень. Пристрої для майнінгу обчислюють оновлений рівень довіри пристрою-відправника і відправляють цей рівень довіри до блокчейну після додавання нового блоку до локального ланцюжка наступним.

Пристрій-майнер на основі рішення задачі візантійських генералів виконає умови механізму консенсуса Practical Byzantine Fault Tolerance (PBFT), коли вирішить головоломку складності, знаходячи значення одноразового номера. Знайшовши одноразовий номер, його транслює мережі блокчейн. Інші Fog-термінали отримують новий блок і відповідно до політик перевірки самостійно перевіряють правильність повідомлення про подію. Це гарантує, що у мережі транслюються лише законні блоки. Незалежна перевірка також гарантує, що пристрої для майнінгу, які поведуться чесно, інтегрують свої блоки в блокчейн і таким чином отримують винагороду. Fog-пристрої для майнінгу, які поведуться нечесно, отримують відмову у своїх блоках. В результаті вони не тільки втрачають винагороду, а й витрачають марну енергію, що використовується для обчислення рішення механізму консенсуса PBFT. Якщо інформація про новий блок вірна, то Fog-пристрої для майнінгу приймають її і починають видобувати нові блоки поверх неї. Існування повідомлення про подію в блокчейні є свого роду підтвердженням того, що повідомлення про подію заслуговує на довіру.

Застосування у розробленій інфраструктурі граничних обчислень для блокчейну можуть скоротити затримку генерації блоків за рахунок розвантаження потужного механізму консенсуса PBFT на прикордонні сервери для майнінгу блоків Fog-майнерами. Крім того, затримку розповсюдження блоків можна зменшити за допомогою граничних хмарних обчислень. Mobile Edge Computing (MEC) може надавати граничні хмарні послуги на периферії для вузлів локального кластера Fog-терміналів та переносити ресурсомістку роботу з термінальних вузлів на прикордонні сервери. MEC можна використовувати для розповсюдження блокових повідомлень між вузлами майнера, що може зменшити затримку розповсюдження. На додаток до цього термінальні вузли розвантажують процес майнінгу на сервери MEC, щоб прискорити процес майнінгу. Оскільки ми

маємо справу з повідомленнями про надзвичайні ситуації, своєчасність розповсюдження повідомлень має першочергове значення. Прикордонні обчислення можна використовувати для швидшого майнінгу блоків у пропонованій нами інфраструктурі блокчейну.

Загальний алгоритм адаптивного функціонування абонента при блокуванні прямої видимості в гетерогенній мобільній мережі терагерцового діапазону здійснюють наступним чином.

Крок 1. Абонент спочатку встановлює з'єднання з довільною базовою станцією, і надсилає власні вимоги.

Крок 2. Базова станція надсилає запит сервісу абонента разом з його публічним ключем у блокчейн для перевірки смарт-контрактом.

Крок 3. Якщо інформація про абонента підтверджена у розподіленому реєстрі, смарт-контракт визначає локальний кластер Fog-пристроїв на базі алгоритма K-середніх для визначення центру скупчення користувачів, а також бджолиного алгоритму для визначення пристрою туману, який виконує необхідні вимоги до міграції на нього відповідного мікросервісу для забезпечення подолання ефектів блокування передачі в мобільних системах.

Крок 4. Базова станція направляє абоненту сертифікат на використання послуги мікросервісу для забезпечення подолання ефектів блокування передачі в мобільних системах при застосуванні терагерцового діапазону довжин хвиль, який формується заздалегідь блокчейном і передається абоненту після завершення процедур оформлення запиту на встановлення сеансу зв'язку.

Крок 5. Абонент надсилає запит на реєстрацію у мережі обраного оператора вибраного кластера Fog-пристроїв.

Крок 6. Оператор підтверджують реєстрацію абонента в мережах обраного оператором вибраного кластера Fog-пристроїв.

Крок 7. Процедура встановлення адресного з'єднання оператором і переведення Fog-пристроїв вибраного кластера у режим моніторингу робочого стану зв'язку лінії абонента, який знаходиться в режимі ведення зв'язку.

Крок 8. Fog-пристрої вибраного кластера оновлюють реєстр угоди про рівень обслуговування (SLA) в мережі блокчейн для запуску процесу тарифікації зв'язку для абонента.

Крок 9. Процес перевибору Fog-пристроїв у локальному кластері базової станції при блокуванні передачі в мобільних системах при застосуванні терагерцового діапазону довжин хвиль.

Fog-термінали, які отримують повідомлення про подію, спочатку перевіряють рівень довіри Fog-терміналу – відправника у блокчейні, а потім перевіряють повідомлення про подію. Вони перевіряють кожне повідомлення про подію на основі доказів, що стосуються рівня довіри відправляючого Fog-терміналу, розташування події, ідентифікатора події, дані алгоритму PoL, позначки часу і т. д., і зберігають повідомлення в локальному пулі пам'яті, якщо повідомлення вважається заслугою на довіру. В іншому випадку, повідомлення відкидається. Повідомлення про подію транслюється в локальній мережі блокчейну, і кожен Fog-термінал у мережі підтверджує повідомлення про подію.

Крок 10. Запускається механізм виконання процедур смарт-контракту сертифікату на використання послуги мікросервісу для забезпечення подолання ефектів блокування передачі в мобільних системах.

Висновки. Запропоновано удосконалений тип блокчейн, який можна використовувати для ефективної перевірки надійності вузлів та повідомлень про події мікросервісу для забезпечення подолання ефектів блокування передачі в мобільних системах при застосуванні терагерцового діапазону довжин хвиль. Наведено загальний алгоритм адаптивного функціонування абонента при блокуванні передачі прямої видимості при застосуванні терагерцового діапазону довжин хвиль.

Список літератури:

1. Сайко В.Г., Наритник Т.М. Модель підвищення показників якості обслуговування гетерогенної мережної інфраструктури терагерцового діапазону. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського: серія технічні науки*. 2023. Т. 34(73). № 1.
2. Saiko Volodymyr, Narytnyk Teodor. High-reliability 5G / IoT mobile communication method when using the terahertz wavelength range. *Theoretical and scientific foundations in research in Engineering: collective monograph / Saiko V., Narytnyk T. – etc. – International Science Group. – Boston : Primedia eLaunch, 2022. pp.477-497. Available at : DOI – 10.46299/ISG.2022.MONO.TECH.1 URL: https://isg-konf.com/theoretical-and-scientific-foundations-in-research-in-engineering/*
3. A. Lei, C. Ogah, E. Al. A Secure Key Management Scheme for Heterogeneous Secure Vehicular Communication Systems. *ZTE Communication Magazine*. 2016. vol. 111.
4. B. Leiding, P. Memarmoshrefi, D. Hogrefe Self-managed and blockchain-based vehicular ad-hoc networks *Proc. 2016 ACM Int. Jt. Conf. Pervasive Ubiquitous Comput. Adjunct.* – UbiComp, 2016. vol. 16 , p. 137140 January
5. A. Dorri, M. Steger, S. Kanhere, R. Jurdak. BlockChain: a distributed solution to automotive security and privacy. *IEEE Commun. Mag. Mag.*, 2017. vol. 55 (12), Article 119125
6. Табернакулов, А. Блокчейн на практике. Москва: Альпина Паблишер, 2019. 260 с.
7. Igor M. Coelho; Vitor N. Coelho; Rodolfo P. Araujo; Wang Yong Qiang; Brett D. Rhodes. (2020). Challenges of PBFT-Inspired Consensus for Blockchain and Enhancements over Neo dBFT. *Future Internet*. 2020. vol. 12 (8).
8. Бардин, А.П. Обработка ошибочных ситуаций в больших блокчейн – сетях алгоритмом достижения консенсуса, основанном на решении задачи византийских генералов. *Вестник МГТУ имени М.Э.Баумана*. 2021. № 4. С. 28-37.
9. Фокин Г.А. Технологии сетевого позиционирования 5G. М.: Горячая линия – Телеком, 2021. 456 с.

Saiko V.G., Narytnyk T.M. APPLICATION OF BLOCKCHAIN SYSTEM FOR SECURE MESSAGING IN GETEROGENNIC MOBILE NETWORKS OF TERAHERTZ RANGE

Recommendations are made on the implementation of blockchain solution in one of the promising services of the new generation networks, such as the provision of mitigation of the effects of blocking of transmission in mobile systems at the application of terahertz range of wavelengths. The presented solution allows to increase confidentiality and reliability of the transmitted data, to provide new opportunities for decision making and to reduce delays and increase energy efficiency. An innovative type of blockchain is offered, which can be used for effective verification of reliability of nodes and messages about events of microservice providing mitigation of effects of blocking of transmission in mobile systems at application of terahertz range of wavelengths. Its main features are: a new block infrastructure for storing node and message authenticity in a 5G mobile network. In this structure, the host's authenticity and the messages that act as transactions similar to blockchain Bitcoin. However, we deal with reporting events as transactions, not cryptocurrencies. To reduce the delay at generation of blocks, the boundary calculation in blockchain is applied. Border calculations will reduce delays by transferring complex calculations to border devices. On the basis of the new blockchain structure the general algorithm of adaptive functioning of the subscriber at blocking of the transmission of direct visibility in the heterogeneous mobile network of terahertz range has been developed. Application of the proposed solution in the decentralized network of mobile communications 5G, the basis of which is the infrastructure of blockchain, potentially reduces the complexity of the network, significantly reduces the operator's operating expenses and accordingly increases the reliability and efficiency of the mechanism of adaptive provision of the subscriber with real mode in blocking the transmission of direct visibility.

Key words: blockchain, mobile communication, terahertz range, transmission blocking.

Сайко В.Г.

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

Наритник Т.М.

Інститут електроніки та зв'язку Української академії наук

МОДЕЛЬ ПРОГНОЗУВАННЯ СИСТЕМНИХ ПАРАМЕТРІВ БЛОКЧЕЙН-СИСТЕМ В ГЕТЕРОГЕННИХ МОБІЛЬНИХ МЕРЕЖАХ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДІАПАЗОНУ

У зв'язку з появою передових технологій та безлічі різноманітних додатків в даний час важливим елементом на мережах зв'язку 5G стає технологія розподіленого реєстру через її технічні можливості та особливості. Вона може знайти застосування у двох ключових аспектах управління мережею, а саме управління сеансом та управління доступом та мобільністю. Тому автори запропонували для мікросервісу по забезпеченню подолання ефектів блокування передачі в мобільних системах 5G при застосуванні терагерцового діапазону довжин хвиль використати технологію розподіленого реєстру і відповідно реалізацію на його основі механізму попереджувального хендоверу [1,2]. Але слід зазначити, що ряд мережевих та системних параметрів розподіленого реєстру впливають на надійність мережі, що може виявитися критичним для даного мікросервісу. Тому у статті розглянуто та проаналізовано існуючі підходи для оцінки показників ефективності функціонування мереж при застосуванні блокчейн систем. Для проведення досліджень в якості системного параметра взята затримка транзакцій блокчейна, що забезпечує функціонування локального кластера для забезпечення подолання ефектів блокування передачі в мобільних системах. Наводиться аналіз сучасних підходів для оцінки кількісних та якісних показників функціонування мереж при застосуванні розподіленого реєстру. На даний момент запропоновано безліч алгоритмів прогнозування характеристик трафіку на основі використання нейронних мереж, таких як ARIMA, фільтр Калмана, фільтр частинок та теоретичні методи розповсюдження трафіку. Але ці методи для мереж зв'язку n'ятого покоління не показують необхідної ефективності [3]. Виходячи з основних переваг та недоліків, розроблено та реалізовано нейромережний спосіб проектування затримки транзакцій блокчейна на основі використання нейронних мереж NAR та NARX. Наводиться опис ключових результатів моделювання, в рамках якого проводився аналіз затримки транзакцій блокчейна.

Ключові слова: блокчейн, мобільний зв'язок, терагерцового діапазону, блокування передачі.

Постановка проблеми. У сучасних мобільних мережах під час передачі обслуговування (хендовера) користувацького обладнання об'єкт управління мобільністю повинен використовувати контекстну інформацію обладнання [4]. Ця подія запускає послідовну взаємодію та передачу сигналів між кількома об'єктами керування мобільністю та сеансом. У гетерогенній мережі при використанні терагерцового діапазону хвиль цей спосіб є мало ефективний, особливо при частих подіях передачі обслуговування при блокуванні передачі в терагерцовому діапазоні. Тому автори запропонували для вирішення такої задачі використати технологію розподіленого реєстру для реалізації механізму попереджувального хендоверу при блокуванні передачі в терагерцовому діапазоні [1, 2]. Але при реалізації даного рішення необхідно враховувати наступне.

Блокчейн система для забезпечення функціонування локального кластеру утворює слабопов'язану мережу без фіксованої топології та структури, що робить її одноранговою та децентралізованою. У неї передбачається задіяти відповідну кількість вузлів локального кластеру на мережі для вирішення завдань забезпечення подолання ефектів блокування передачі в мобільних системах із додатковим обсягом службового трафіку та постійного обміну. Нову підтверджену транзакцію, отриману будь-яким вузлом мережі, буде відправлено вузлам, підключеним до нього, кожен з яких відправить транзакцію в свою чергу вже своїм сусідам. Те, що відбувалося раніше на одному пристрої, тепер дублюється на всі вузли, у зв'язку з чим збільшується кількість повідомлень, що передаються в n разів (n – кількість задіяних вузлів). Такі дані передаються порціями

за короткий проміжок часу, що призводить до різких сплесків повідомлень, що передаються, і при великих обсягах може порушити роботу мережі. Таким чином, блокчейн впливає на показники мережі, а характеристики мережі впливають на коректну роботу системи блокчейн, зокрема підтвердження блоку і верифікацію транзакцій.

Але при цьому мережеві характеристики мережі можуть значно вплинути на роботу самої системи блокчейн, проте система блокчейн може варіювати деякі параметри для досягнення кращих показників та масштабованості. Одними із основних процесів, які суттєво впливають на дані показники є кількість вузлів та інтенсивність формування транзакцій у блокчейн та розмір блоків та інтервал часу підтвердження блоків. Далі розглянемо деякі аспекти цього процесу більш детально.

– *Кількість вузлів та інтенсивність формування транзакцій у блокчейн* системі суттєво впливають на мережеві характеристики, оскільки при збільшенні числа працюючих вузлів або інтенсивності формування транзакцій зростає кількість інформації, що передається та обробляється, як у процесі валідації, так і в процесі синхронізації актуальних реєстрів. Збільшення кількості транзакцій прямо пропорційно до збільшення часу підтвердження [5]. Збільшення числа однорангових вузлів негативно позначиться на продуктивності блокчейн-платформ, це може призводити до того, що деякі платформи перестають відповідати на запити від вузлів, що перевищують певну кількість. Збільшення кількості транзакцій підвищує навантаження на систему та мережу та призводить до затримки в мережі [6]. Рішенням, що дозволяє знизити негативний вплив даного параметра є оптимізація кількості повних і легких вузлів.

– *Розмір блоків та інтервал часу підтвердження блоків* також впливають на мережеві характеристики та пропускну спроможність транзакцій. При цьому існує залежність між розміром блоку і часом його поширення, яка представлена в [7] та впливу інтервалу блоків та розмірів блоків на швидкості старіння блоків [8]. Для того, щоб зменшити час обробки транзакцій, можна збільшити розмір блоку, щоб валідатори могли включати більше транзакцій в один блок. Якщо розмір блоку збільшується, кількість транзакцій, що обробляються за секунду, відповідно зростає. Це скорочує час включення транзакції до блоку та зменшує затримку на рівні системи.

Слід також зазначити, що ряд мережевих та системних параметрів блокчейн впливають також на надійність мережі, що може виявитися критич-

ним для мікросервісу для забезпечення подолання ефектів блокування передачі в мобільних системах при застосуванні терагерцового діапазону довжин хвиль.

Наприклад, інтервал часу підтвердження блоків і розмір блоку значно впливають на надійність блокчейна, оскільки вони безпосередньо впливають на швидкість старіння блоків (див. рис. 1 та 2 відповідно, які побудовані на основі даних [8]).

Очевидно, що різні конфігурації параметрів можуть забезпечити однакову пропускну здатність транзакцій, при цьому у систем з однаковим значенням пропускну здатності транзакцій ймовірність появи помилок блоку може змінюватись.

Ймовірність не появи помилкових блоків системи, %

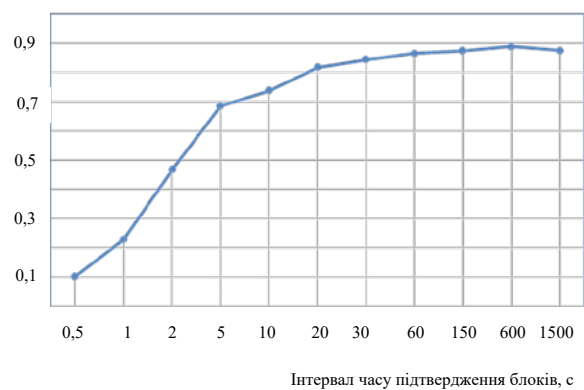


Рис. 1. Графік впливу інтервалу часу підтвердження блоків на ймовірність появи помилкових блоків

Ймовірність не появи помилкових блоків системи, %

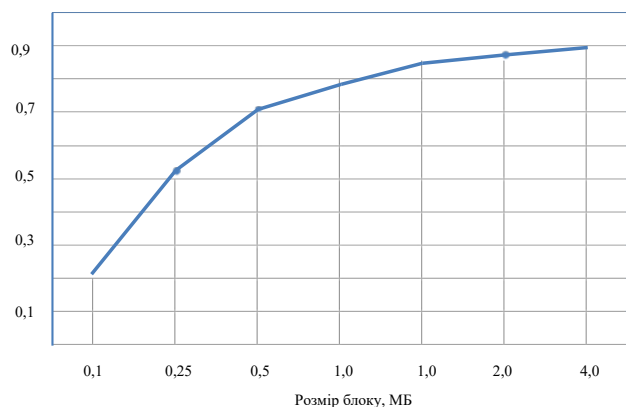


Рис. 2. Графік впливу розміру блоку на ймовірність появи помилкових блоків

Це також може сприяти появі нестачі ресурсів, що, у свою чергу, призведе до збільшення ймовірності втрати пакетів та зростання затримок. Тому важливо визначити необхідні оцінки показників якості обслуговування щодо забезпечення подолання ефектів блокування передачі в мобільних системах при використанні терагерцового діапа-

зону хвиль. Якість обслуговування (QoS) – сукупність характеристик послуг зв'язку, що стосуються можливості задовольняти встановлені та передбачувані потреби користувача послуги. В якості такого системного параметра в даній роботі взята затримка транзакцій блокчейна, що забезпечує функціонування локального кластера для забезпечення подолання ефектів блокування передачі в мобільних системах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для оцінки кількісних та якісних показників функціонування мереж при застосуванні розподіленого реєстру можна використовувати різні засоби:

- аналітичне моделювання;
- імітаційне моделювання;
- моделювання із застосуванням машинного навчання.

Натомість на сьогоднішній день в області аналітичних рішень можна знайти вкрай мало інформації про моделювання мережеских процесів блокчейна. Хоча дослідники намагаються визначити математичні моделі для опису процесів роботи блокчейн технологій та їх залежності [9, 10]. Однак у більшості рішень аналізуються окремі випадки систем і не враховуються мережескі аспекти.

Безперечною перевагою імітаційного моделювання є можливість отримання чисельних рішень для тих моделей, які не можуть бути описані кінцевими аналітичними виразами [11, 12]. Не всі завдання можуть бути вирішені з використанням імітаційного моделювання, наприклад, завдання, що потребують надто великого обсягу обчислень через обмежувальний ресурс обчислювальних систем та кінцевий час виконання операцій.

З цієї точки зору представляє інтерес для вирішення поставленої задачі моделювання із застосуванням машинного навчання і прогнозування часових рядів, яке відноситься до прогнозування наступних значень системи на основі попередніх та поточних даних.

Постановка завдання. У зв'язку з вище наведеним виникає задача розглянути, як блокчейн вплине на роботу гетерогенної мережі та як позначиться його подальше зростання на функціонування Fog-пристроїв локального кластера мікросервісу для забезпечення подолання ефектів блокування передачі в мобільних системах при застосуванні терагерцового діапазону довжин хвиль.

Виклад основного матеріалу дослідження.

На сьогоднішній день як інструмент для прогнозу відомо безліч підходів, серед яких можна виділити:

- регресійні та авторегресійні методи прогнозування;
- методи, що базуються на експоненційному згладжуванні;
- методи з урахуванням ланцюгів Маркова;
- на основі класифікаційно-регресійних дерев;
- нейромереві методи прогнозу.

У роботі [13] наведено порівняльну характеристику перерахованих способів.

Оскільки динаміка затримки транзакцій швидко змінюється в часі, то прогноз доцільно здійснювати на основі динамічних (з тимчасовою затримкою) штучних нейронних мереж. Як такі мережі найчастіше використовуються:

- нейромережа Джордона (JNN) [14], яка є динамічною рекурентною двошаровою мережею та побудована на базі багат шарового персептрона

(Multilayered perceptron – MLP);

- нейромережа Елмана (ENN) або проста рекурентна мережа (SRN) [14], яка є динамічною рекурентною двошаровою мережею і побудована на базі MLP;

- рекурентний багат шаровий персептрон RMLP [15], який є динамічною багат шаровою рекурентною мережею і побудований на базі MLP;

- модель нелінійної авторегресії з екзогенними (тобто зовнішніми) входами NARX [15], яка є динамічною рекурентною двошаровою мережею та побудована на базі MLP;

- нейромережа із затримкою за часом (TDNN) [15], яка є динамічною (з тимчасовою затримкою) нерекурентною багат шаровою мережею.

- розподілена мережа прямого поширення із затримкою за часом (distributed TLFN) [15], яка є динамічною нерекурентною двошаровою мережею.

- динамічна (з тимчасовою затримкою) нерекурентна багат шарова мережа VNN [16], класи якої поділяються гіперплощинами.

Оскільки відповідно досліджень [14-16] NARX дає найбільшу точність прогнозу, ця мережа була вибрана для розв'язання задач прогнозування затримки транзакцій блокчейна.

Нейронна мережа NARX

NARX є нелінійною авторегресійною нейронною мережею із зовнішніми входами. NARX – це динамічні рекурентні нейронні мережі RNN. Мережі NARX засновані на моделях часових рядів ARX, які зазвичай використовуються для операцій з тимчасовими рядами та вважаються нелінійною формою моделі ARX. Моделі NARX можуть імітувати різні динамічні нелінійні методи; вони використовувалися на вирішення

безлічі завдань, включаючи моделювання часових рядів. Мережа NARX використовує попередні вимірювання існуючих часових рядів, щоб робити прогнози, та попередні значення інших вхідних даних робити прогнози для часового ряду. NARX – це надійний інструмент, що підходить для систем нелінійного моделювання. Понад те, NARX навчається ефективніше, ніж інші часові ряди нейронних мереж, використовуючи алгоритм навчання градієнтного спуску. Мережі NARX успішно використовувалися в багатьох програмах для прогнозування майбутніх значень вхідного сигналу. Мережі NARX краще працюють із прогнозами, коли прогнозований результат залежить від вхідних даних, які існують у минулі моменти часу. NARX також є нелінійним фільтром, навчальні дані якого навчаються із чистими даними вхідної інформації.

Прогнозування затримки транзакцій блокчейна із використанням нейронної мережі

Моделювання затримки транзакцій блокчейна, що забезпечує функціонування локального кластеру проводилося з використанням пакету моделювання Matlab R2020a із застосуванням нейронних мереж NAR та NARX. Точність прогнозування оцінювалася з використанням трьох алгоритмів навчання нейронної мережі: Levenberg Marquardt, Bayesian Regularization, Scaled Conjugate Gradient, з точки зору використання, а корінь із середньоквадратичної помилки (RMSE) та середня абсолютна помилка у відсотках (MAPE) як міра точності прогнозування. Набори даних були згенеровані моделями при проведенні досліджень за допомогою системи моделювання AnyLogic [17]. Після збору та підготовки набору даних вони були поділені на 70% для навчання, 15% для тестування та 15% для валідації відповідно. Як показали результати моделювання алгоритм навчання нейронної мережі Левенберга-Марквардта із зворотним розповсюдженням має кращу точність прогнозування і з RMSE, і з MAPE як при прогнозуванні.

Нелінійна авторегресійна нейронна мережа NAR

Побудована мережа має один прихований шар із вісьма нейронами та один вихідний шар з одним нейроном. Прогнозується затримка транзакцій на один крок вперед із використанням попередніх даних: розміру блоку, часу обробки блоку, інтенсивності формування транзакцій. Як алгоритм навчання використовується сучасний метод нелінійної оптимізації: алгоритм Левенберга-Маркара.

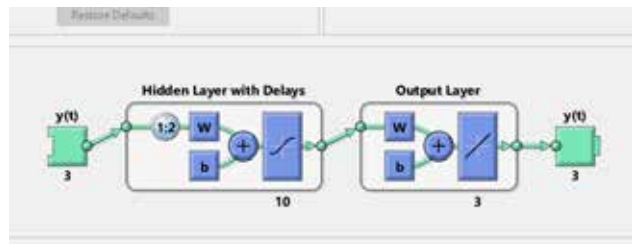


Рис. 3. Нелінійна авторегресійна нейронна мережа NAR: Hidden – прихований шар; Output – вихідний шар; 1, 8 – кількість нейронів у шарі

Гістограма помилок виходу нелінійної авторегресійної нейронної мережі NAR показана на рис. 4.

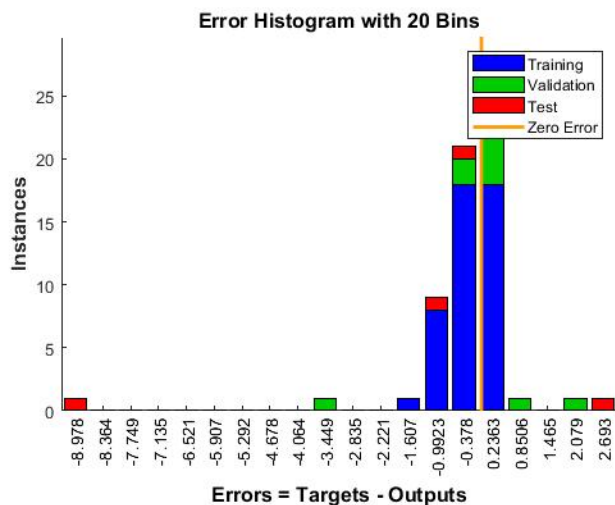


Рис. 4. Гістограма помилок виходу нелінійної авторегресійної нейронної мережі NAR

Графік результату прогнозу показано на рис. 5.

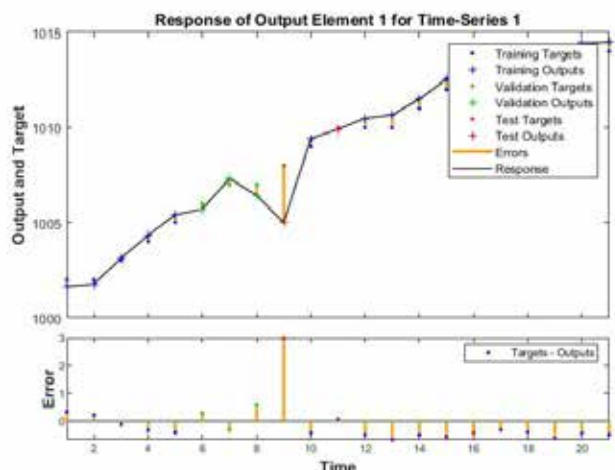


Рис. 5. Графік результату прогнозу нелінійної авторегресійної нейронної мережі NAR

Точність прогнозування мережі становить приблизно 72%.

Нелінійна авторегресійна нейронна мережа з екзогенними входами NARX

Для вирішення задачі дослідження була використана нелінійна авторегресійна нейронна мережа з екзогенними входами, де прогноз робиться виходячи з попередніх значень прогнозованої змінної та екзогенних входних сигналів. Побудована мережа має один прихований шар із вісьма нейронами та один вихідний шар із одним нейроном. Прогнозується затримка транзакцій на один крок вперед із використанням попередніх даних значень розміру блоку, часу обробки блоку, інтенсивності формування транзакцій. Як алгоритм навчання використовується сучасний метод нелінійної оптимізації: алгоритм Левенберга-Маркара.

Входи мережі: X_0 – затримка транзакцій; X_1 – розмір блоку; X_2 – час обробки блоку; X_3 – інтенсивність формування транзакцій; Вихід мережі: Y – прогнозована затримка транзакцій. Збудована мережа зображена на рис. 7.

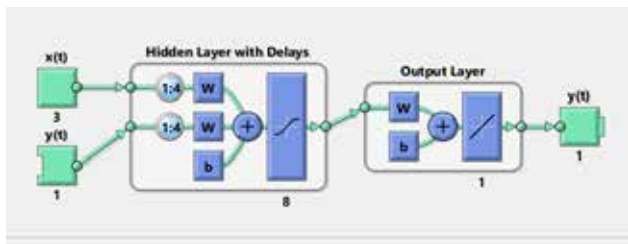


Рис. 6. Нелінійна авторегресійна нейронна мережа з екзогенними входами NARX: Hidden – прихований шар; Output – вихідний шар; 1, 8 – кількість нейронів у шарі

Гістограма помилок виходу мережі показано на рис. 7.

Графік результату прогнозу показано на рис. 8. Точність прогнозування мережі становить приблизно 88%

Висновки. У статті розглянуто та проаналізовано існуючі підходи для оцінки показників функціонування мереж при застосуванні блокчейн систем. Виходячи з основних переваг та недоліків, розроблено та реалізовано нейромережний спосіб проектування затримки транзакцій блокчейна, що забезпечує функціонування локального кластера при подоланні ефекту

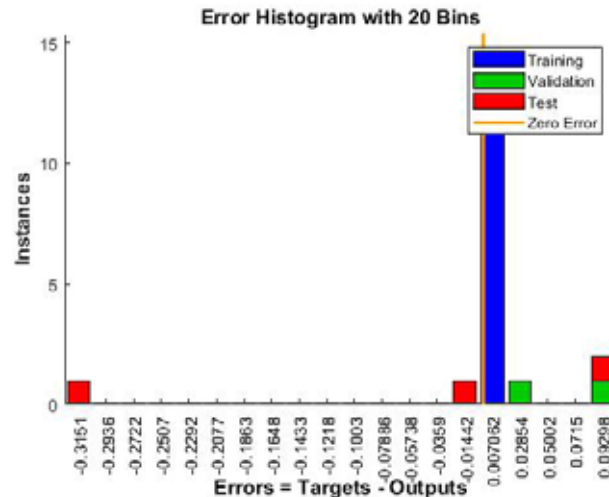


Рис. 7. Гістограма помилок виходу нелінійної авторегресійної мережі з екзогенними входами NARX

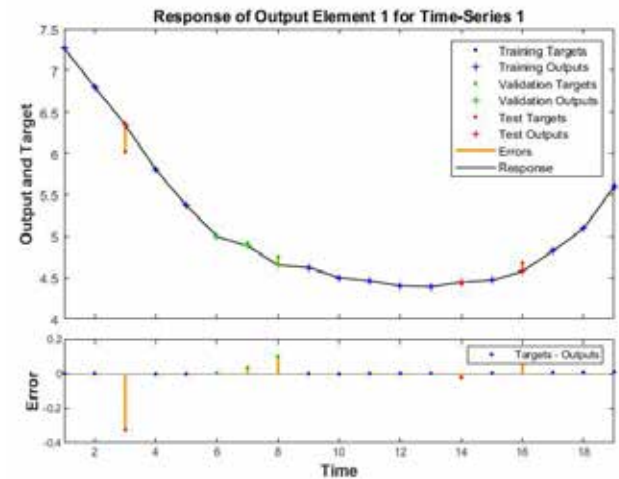


Рис. 8. Графік результату прогнозу нелінійної авторегресійної мережі з екзогенними входами NARX

блокування передачі в мобільних системах, на основі використання нейронних мереж. В результаті комп'ютерного моделювання показано, що при використанні нелінійної авторегресійної нейронної мережі NAR точність прогнозування мережі складає 72%, а при використанні авторегресійної нейронної мережі з екзогенними входами NARX – 88%.

Список літератури:

1. Сайко В.Г., Наритник Т.М. Модель підвищення показників якості обслуговування гетерогенної мережної інфраструктури терагерцового діапазону. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського: серія технічні науки*. 2023. Т. 34(73). № 1.
2. Saiko Volodymyr, Narytnyk Teodor. High-reliability 5G / IoT mobile communication method when using the terahertz wavelength range. *Theoretical and scientific foundations in research in Engineering: collective monograph / Saiko V., Narytnyk T. – etc. – International Science Group. – Boston : Primedia eLaunch, 2022. pp.477-497. Available at: DOI – 10.46299/ISG.2022.MONO.TECH.1 URL: https://isg-konf.com/theoretical-and-scientific-foundations-in-research-in-engineering/*

3. Boutaba R. A comprehensive survey on machine learning for networking: evolution, applications, and opportunities. *J Internet serv Appl*. 2018. vol 9. acticle number 16.
4. Сайко В.Г., Одарченко Р.С., Абакумова А.О., Наритник Т.М., Наконечний В.С., Домрачев В.М., Толюпа С.В., Заблоцький В.Ю., Баховський П.Ф. Мережі мобільного зв'язку нового покоління 4G/5G/6G: Київ: ТОВ «Про формат», 2021. 200 с.
5. Goswami, S. Scalability analysis of blockchains through blockchain simulation: Las-Vegas, 2017. 67 с.
6. Dabbagh, M. A survey of empirical performance evaluation of permissioned blockchain platforms: Challenges and opportunities. *Computers & Security*. – 2021. № 100. С. 1-13.
7. Decker, C. Information propagation in the Bitcoin network. *IEEE P2P 2013 Proceedings*, 2013. С. 1-10.
8. Gervais, A. On the Security and Performance of Proof of Work Blockchains. *CCS '16: Proceedings of the 2016 ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security*, 2016. С. 3-16.
9. X. Ling, Y. Le, J. Wang. Practical Modeling and Analysis of Blockchain Radio Access Network. *IEEE Transactions on Communications*, 2020. С. 1021 – 1037
10. R. A. Memon, J. P. Li, J. Ahmed. Simulation Model for Blockchain Systems Using Queuing Theory. *Electronics*, 2019. № 8. С. 234.
11. Rinkeby Network Dashboard [Електронний ресурс]. – Електрон. дан. – 2022. Режим доступа: <https://www.rinkeby.io/#stats>, свободный, (дата обращения 25 января 2022).
12. GitHub. Ganache: A tool for creating a local blockchain for fast Ethereum development [Електронний ресурс]. Электрон. дан. – 2021. Режим доступа: <https://github.com/trufflesuite/ganache-cli>, свободный, (дата обращения 3 февраля 2022).
13. Чучуева И.А. Модель прогнозирования временных рядов по выборке максимального подобию: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.18 . Москва, 2012. 153 с.
14. Е.В. Бодянский, О.Г. Руденко. Искусственные нейронные сети: архитектуры, обучение, применение. Харьков: Телетех, 2004. 159 с.
15. Haykin S. Neural networks . NY: Pearson Education, 1999. p. 823.
16. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации. М.: Финансы и статистика, 2002. 344 с.
17. Елагина В.С. и др. Основные сетевые характеристики blockchain трафика и подходы к моделированию. *T-Com: Телекоммуникации и транспорт*, 2020. Том. 14 № 4. с. 39-45.

Saiko V.G., Narytnyk T.M. MODEL OF FORECASTING OF SYSTEM PARAMETERS OF BLOCKCHAIN SYSTEMS IN GETEROGENNIC MOBILE NETWORKS OF TERAHERTZ RANGE

Due to the emergence of advanced technologies and a variety of applications, distributed ledger technology is now becoming an important element in 5G communication networks due to its technical capabilities and features. It can find applications in two key aspects of network management, namely session management and access and mobility management. Therefore, the authors proposed to use the technology of the distributed register and, accordingly, the implementation of the preventive handover mechanism based on it for the microservice to overcome the effects of transmission blocking in 5G mobile systems when using the terahertz range of wavelengths [1,2]. But it should be noted that a number of network and system parameters of the distributed registry affect the reliability of the network, which may be critical for this microservice. Therefore, the article examines and analyzes the existing approaches for evaluating the performance indicators of networks when using blockchain systems. To conduct research, the delay of blockchain transactions is taken as a system parameter, which ensures the functioning of a local cluster to ensure overcoming the effects of transmission blocking in mobile systems. An analysis of modern approaches for evaluating quantitative and qualitative indicators of the functioning of networks when using a distributed registry is given. Currently, many algorithms for predicting traffic characteristics have been proposed based on the use of neural networks, such as ARIMA, Kalman filter, particle filter, and theoretical methods of traffic distribution. But these methods for fifth generation communication networks do not show the necessary efficiency [3]. Based on the main advantages and disadvantages, a neural network method for designing blockchain transaction delay based on the use of NAR and NARX neural networks has been developed and implemented. A description of the key results of the simulation, which was used to analyze the latency of blockchain transactions, is provided.

Key words: blockchain, mobile communication, terahertz range, transmission blocking.

Сайко В.Г.

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

Наритник Т.М.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ТРИВИМІРНІ БАГАТОШАРОВІ МЕРЕЖІ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДІАПАЗОНУ

Дана стаття є продовженням циклу статей [1-3], присвячених розробці модельно-методичного апарату реалізації нової інноваційної послуги мереж п'ятого та наступних поколінь – використання ресурсу локального кластеру мережевої інфраструктури терагерцового діапазону з інтегрованими інтелектуальними поверхнями (РПП) для забезпечення надійності зв'язку. Завдання в такій постановці актуальне і потрібне для надцільних безпроводових мереж міліметрового та терагерцового діапазонів нового покоління.

Для рішення такої задачі перспективною тенденцією є перехід до тривимірного простору для дослідження у галузі таких мереж зв'язку нового покоління. При цьому у розробці науково обґрунтованих методик планування мереж важливо мати розуміння їх архітектури та функціонування у тривимірному просторі. Оскільки мережі, що використовують терагерцовий діапазон хвиль, є гетерогенними, цікаво дослідити спільне використання мереж мобільного зв'язку та мереж РПП у тривимірному просторі, що є темою даної статті.

У статті введено поняття тривимірних багатошарових гетерогенних мереж при використанні терагерцового діапазону частот, запропоновано архітектурні рішення для таких мереж, а також досліджено ймовірність успішного радіоприймання на прикладі багатошарової гетерогенної мережі. Отримана модель дозволяє оцінити якість каналу зв'язку шляхом оцінки відношення сигнал завада та відношення сигнал шум для вузлів мережі. Використання моделі дозволяє стверджувати, що в сучасному багатоповерховому будинку, при розміщенні вузлів у кожному приміщенні, може бути побудована мережа бездротового зв'язку при використанні терагерцового діапазону хвиль, причому якість радіоканалу дозволяє використовувати максимально досяжні для сучасних стандартів швидкості передачі даних.

Ключові слова: мобільний зв'язок, терагерцовий діапазон, блокування передачі, тривимірні багатошарові мережі.

Постановка проблеми. У реальних умовах мобільним системам 5G NR у терагерцовому діапазоні хвиль у більшості випадків досить складно працювати через рухомі перешкоди, такі як люди та транспортні засоби, які можуть блокувати радіосигнал. Якщо мобільний пристрій потрапляє в зону блокування радіосигналу, то залежно від середовища та відстані до базової станції NR BS, пристрій може втратити покриття BS або знизити якість сигналу, щоб запобігти помилкам передачі [4, 5]. Є рішення для підключення користувачів до кількох базових станцій (БС) одночасно, що дозволяє уникнути блокування сигналу, але його технічна реалізація на існуючій мобільній інфраструктурі 5G може привести до додаткових затримок та зниження ефективності системи [6].

Нові технічні рішення з інтегрованими інтелектуальними поверхнями, що реконфігуруються (РПП),

представляють інтерес з точки зору швидкого формування променя та подолання ефектів блокування в системах міліметрових та терагерцових діапазонів хвиль. Інтелектуальні поверхні РПП є багатообіцяючою парадигмою проектування бездротових мереж та можуть створювати інтелектуальне радіосередовище [7]. РПП-мережа може створювати великомасштабні інтелектуальні радіоканали для обслуговування кількох користувачів, оптимізуючи режим передачі та параметри РПП. Використання інтелектуальних радіоканалів може значно покращити якість зв'язку та продуктивність системи, але оцінка каналу на РПП може бути складним завданням через велику кількість елементів, що відбивають промені. Потенціал РПП для локалізації отримав обмежене висвітлення в літературі, включаючи попередні дослідження, в яких RIS працює в режимі прийому як лінза або в режимі відображення.

Але при цьому також необхідно відмітити, що останні кілька десятиліть бездротові мережі переважно будувалися зі статичних наземних точок доступу. Тому, враховуючи поширеність РІП і бажання інтегрувати РІП в стільникові мережі, можна обґрунтовано припустити, що перспективи мобільних систем нового покоління більше не будуть горизонтальними і двовимірними. Тривимірні перспективні вертикальні мережі, що виникають, складаються з безлічі рухомих і висотних точок доступу. Прикладами є автомобільні мережі VANET і цільові мережі, що літають, FANET [8,9].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В [10] з врахуванням особливостей функціонування безпроводової сенсорної мережі у тривимірному просторі був розроблений новий алгоритм вибіру головного вузла кластера.

Нещодавні дослідження показали багатообіцяючі результати у використанні методів машинного навчання для безпосереднього прогнозування оптимальних фазових зрушень РІП і вектора формування променя в БС або повністю минаючи проміжний етап оцінки каналу, або з обмеженим знанням інформації про канал.

У [11] автори запропонували заснований на глибинному навчанні (Deep Learning, DL) підхід для проведення порівняння між вимірюваною інформацією про координати в місцезнаходження користувача і конфігурацією кожного елемента РІП, яка максимізує рівень прийнятого користувачем сигналу в автономному режимі з використанням попередньо створеної бази даних відбитків пальців під час навчання рекурентної нейронної мережі (current neural network, DNN). На онлайн-фазі в навчену модель DNN передавалися виміряні координати цільового місця розташування, щоб вивести оптимальну фазову конфігурацію з акцентом на передбачуване місцезнаходження.

У [12] автори використовували метод DL «актор-критик» для вивчення спільної конструкції матриці формування променя передачі в БС і конфігурації фазового зсуву РІП для системи MISO. Сумарна ставка використовувалася як миттєва винагорода для навчання алгоритму на основі DL. Матриця формування променя передачі та фазові зрушення були отримані спільно шляхом поступового максимізації сумарної швидкості шляхом спостереження винагороди та ітеративного налаштування параметрів.

Цілком природно, що, незважаючи на перспективи і безліч потенційних переваг, підхід машинного навчання до розробки рішень РІП стикається з багатьма проблемами. Ці проблеми також є можливостями майбутніх напрямів досліджень.

І одна із них, це змусити новий підхід, заснований на штучному інтелекті, працювати в реальних експериментах. Майже у всіх роботах, які ми розглянули, дослідження та експериментальні результати ґрунтуються на чисельному моделюванні, яке є податливим першим кроком. Однак загальноновизнано, що дані моделювання є точними, а поведінка, що моделюється, більш детермінованим. У реальному середовищі ці переваги були б недоступними. Надзвичайно важливо вийти за рамки експериментів, заснованих на моделюванні, для вивчення практичної здійсненності та ефективності рішень РІП на основі машинного навчання.

Постановка завдання. Перехід до безпроводових мереж терагерцового діапазону передбачає ще більше збільшення щільності мережі у порівнянні з сучасними мережами. При розробці науково-обґрунтованих методик планування таких мереж важливим є розуміння їх архітектури та функціонування у тривимірному просторі. Оскільки мережі при використанні терагерцового діапазону хвиль є гетерогенними, що більш цікаво – це спільне застосування мереж мобільного зв'язку та мереж РІП у тривимірному просторі, яке є предметом досліджень даної статті. Тому одним із перспективних напрямів у вирішенні даної проблеми авторами пропонується робоча гіпотеза проведення досліджень щодо інтеграції мереж технологій мобільного зв'язку та мереж реконфігурованих інтелектуальних поверхонь у тривимірному просторі для забезпечення подолання ефектів блокування передачі в мобільних системах при застосуванні терагерцового діапазону довжин хвиль.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Архітектура тривимірної багатошарової мережі терагерцового діапазону

Для забезпечення подолання ефектів блокування передачі з підтримкою інтелектуальної поверхні, що реконфігуруються, в мобільних системах при застосуванні терагерцового діапазону довжин хвиль пропонується наступна архітектура тривимірної багатошарової мережі (рис. 1).

Загалом, число шарів тривимірної багатошарової надщільної мережі терагерцового діапазону може мати значення від 1 до n . Навіть якщо мережа має лише один шар, її все одно можна віднести до багатошарових надщільних мереж, оскільки її планування вимагає використання методів планування надщільних мереж. Кожен з шарів мережі може бути реалізований за допомогою однієї з технологій телекомунікацій, наприклад, інтелектуальної поверхні, що реконфігурується. На рис. 1

наведено приклад тривимірної багат шарової гетерогенної надщільної мережі, яку можна розглядати як комбінацію дво- та тривимірних шарів.

Якщо розглядати мережу Fog-терміналів, що знаходиться в обмеженому об'ємі, ми можемо забезпечити її зв'язність за допомогою використання транзитного вузла, розміщеного на мережі РІП з іншими кластерами мережі. Коли розмір кластера невеликий, то всі вузли кластера можуть знаходитися у зоні зв'язку один з одним. Однак, завдання полягає у забезпеченні зв'язності мережі як між вузлами одного кластера, так і між вузлами різних кластерів.

При великій кількості вузлів та кількох кластерах, доцільною є ієрархічна структура, яка включає виділення головних вузлів кластера, що виконують роль транзитних вузлів для зв'язку з вузлами іншого рівня. Це дозволяє ефективно використовувати мережеві ресурси шляхом систематизації обміну даними, зменшує ймовірність колізій та забезпечує зв'язність мережі. Головні вузли є шарнірами, як і вузли на мережі РІП, і їх можна визначити, використовуючи відомі методи, наприклад запропонований у [13]. Цей метод полягає в тому, що мережу описують моделлю повнозв'язкового неорієнтованого графа, знаходять всі компоненти графа та використовують алгоритми пошуку мінімального остова графа. При наявності ребер, довжина яких

перевищує радіус зв'язку відповідного вузла кластерів, вони виключаються зі знайденого остова, що дозволяє отримати кілька компонентів графа. Шарнірами графа є вузли, що з'єднані виключеними ребрами, а для забезпечення зв'язності мережі необхідно отримати зв'язок шарнірів із заданою кількістю РІП.

В залежності від розташування шарнірів, зв'язність їх може бути забезпечена за допомогою одного або кількох РІП. Для забезпечення зв'язності, бажано мінімізувати кількість використовуваних РІП. Метою вибору точок розміщення РІП є забезпечення зв'язності шарнірів, і для цього можна використовувати алгоритм кластеризації FOREL [14], який намагається знайти центри можливих груп (кластерів) зі зв'язними шарнірами, які можуть бути забезпечені одним РІП. Якщо з'являються кластери, що містять лише один шарнір, то відстань між цим та іншими шарнірами перевищує радіус зони зв'язку РІП. У такому випадку можна використовувати комбінацію декількох РІП з більшою дальністю зв'язку на наступному рівні мережі РІП.

Оцінка ймовірності успішного радіоприймання

У бездротових системах зв'язку (БСЗ), оцінка ймовірності успішного радіоприймання є важливою для вивчення одночасних передач, невизначеною

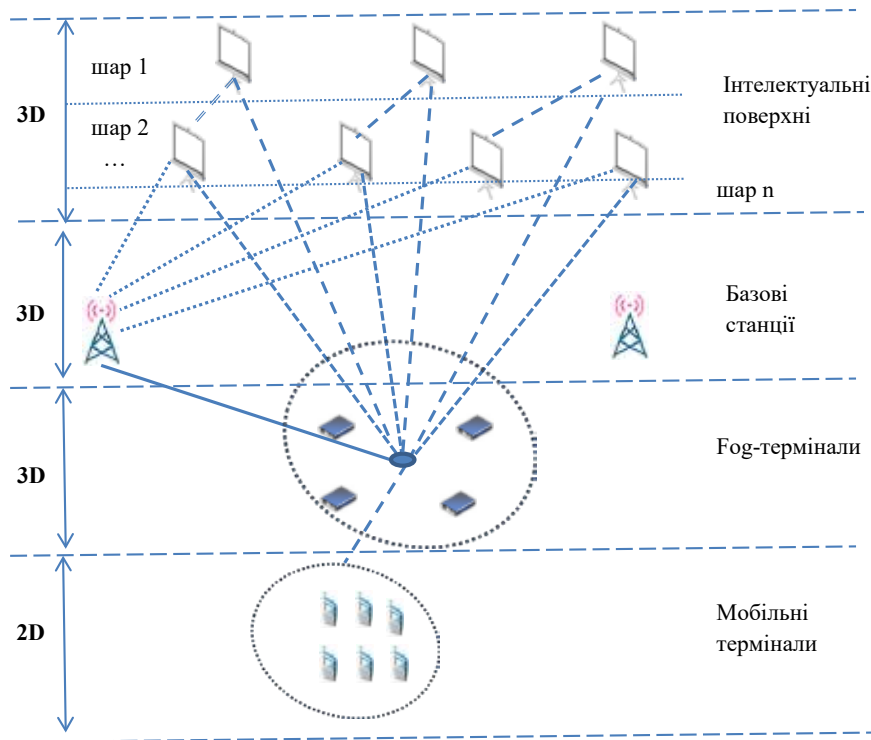


Рис. 1. Модель багат шарової 3D мережі

ності розташування пристроїв та умов поширення радіохвиль. Для цього використовується параметр ймовірності передачі p , але класичний підхід базується на математичній моделі, згідно з якою успішне радіоприймання вважається можливим лише на відстані r_0 , яка не перевищує дальності R . Однак, ця модель не враховує впливу територіального розподілу пристроїв БСЗ та створених ними завад на ймовірність радіоприймання P_{SUC} .

Аналітичну модель формування сигналу завади опишемо виразом для трьох вимірів:

$$P_o = P_p \iiint_w a(x, y, z) dx dy dz, \quad (1)$$

де P_p – потужність завади, що виробляється в одиниці об'єму,

$a(x, y, z)$ – коефіцієнт, що визначає залежність потужності завади в точці O від координат джерела завади,

w – область, що розглядається.

Залежність $a(x, y, z)$ можна виразити через відстань до джерела завади d і уявити як

$$a(d) = \frac{c}{f^2 d^\alpha L(q)}, \quad (2)$$

де d – відстань від точки спостереження до джерела завади, α – коефіцієнт, що залежить від умов поширення сигналу ($\alpha \geq 2$), f – частота сигналу, c – константа (відповідно до задачі $c=10^{2,6}$), $L(q)$ – послаблення сигналу перешкодами, q – кількість перешкод.

З урахуванням дискретної структури модель (1) може бути записана у вигляді суми за трьома вимірами

$$P_o(i, j, h) = p_o \sum_{h=-\infty}^{\infty} \sum_{j=-\infty}^{\infty} \sum_{i=-\infty}^{\infty} a(i, j, h), \quad (3)$$

де p_o – потужність передавача вузла мережі.

Якщо розміри елементарної комірки (довжина, ширина і висота) дорівнюють l, v, s відповідно, то відстань d між точкою спостереження та довільним вузлом комірки можна визначити як

$$d(i, j, h) = \sqrt{(il)^2 + (jv)^2 + (hs)^2}, \quad (4)$$

Послаблення сигналу перешкодами, згідно з моделлю (1), може бути визначено як

$$L(q) = Bq, \quad (5)$$

де B – коефіцієнт ослаблення сигналу перешкодою.

У моделі, що розглядається, зробимо припущення про поширення сигналу строго по прямій, що з'єднує точку спостереження з вузлом $p_{i,j,h}$, тоді кількість перешкод в даному напрямку буде дорівнює кількості вертикальних і горизонтальних площин, що перетинаються, проведених через центри ребер, що з'єднують вузли комірок, тобто. дорівнюватиме сумі абсолютних значень індексів i, j та h :

$$L(i, j, h) = B(|i| + |j| + |h|), \quad (6)$$

Тоді вираз (2) для коефіцієнта зниження потужності може бути виражений через індекси як

$$a(i, j, h) = \frac{c}{L(i, j, h) f^2 \sqrt{(il)^2 + (jv)^2 + (hs)^2}}. \quad (7)$$

Започаткуємо пороговий рівень потужності p_m в точці прийому, при перевищенні якого сигнал не сприймається як завада. Тоді вираз для потужності завади у точці спостереження може бути записано як

$$P_o = 8U \sum_{h=1}^m \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^m J(p_{i,j,h}) p_{i,j,h}, \quad (8)$$

де $p_{(i,j,h)}$ потужність завади, яка створена вузлом i, j, h у точці спостереження; U – інтенсивність навантаження, m – кількість вузлів мережі;

$$p_{i,j,h} = p_o \frac{c}{B(i+j+h) f^2 \sqrt{(il)^2 + (jv)^2 + (hs)^2}}, \quad (9)$$

$J(p_{(i,j,h)})$ – індикаторна функція, яка забезпечує підсумовування тільки потужностей сигналів, що сприймаються як завада.

Для оцінки просторового ущільнення одночасних передач застосовується критерій ймовірності успішного радіоприймання PSUC (SINR) [15]:

$$P_{SUC}(SINR) = P(SINR \geq \gamma), \quad (10)$$

де SINR – відношення сигнал шум плюс завада, γ – граничне значення SINR, яке визначається чутливістю приймального пристрою.

Ймовірність успішного радіоприймання визначається:

$$P_{SUC}[SINR(r_o, \beta_o, \alpha_o, \alpha_i, k_i(p, \mu_s), \gamma)] = P\left(\frac{P_o(r_o, \beta_o, \alpha_o)}{P_{No}} + \sum_{i=1}^{k_i} (p, \mu_s) P_i(r_i, \beta_i, \alpha_i) \geq \gamma\right), \quad (11)$$

де $P_i(r_i, \beta_i, \alpha_i)$ – потужність внутрісистемних завад передавального пристрою TX_i на вході приймача RX_o з врахуванням середніх втрат розповсюдження радіохвиль, повільних та швидких завмирань; $k_i(p, \mu_s)$ – число джерел завад; p – ймовірність передачі пристрою μ_s – щільність пристроїв, P_{No} – потужність теплового шуму.

Оцінка ймовірності успішного радіоприймання з діаграмоутворенням із (11) визначається SINR, що залежить від потужності сигналу $P_o(r_o, \beta_o, \alpha_o)$ та потужності внутрісистемних завад $P_i(r_i, \beta_i, \alpha_i)$. Тому для врахування направленості антени на P_{SUC} потрібно врахувати вплив коефіцієнта підсилення (КП) сигналу і КП внутрішньосистемних завад. Потужність сигналу $P_o(r_o, \beta_o, \alpha_o)$ з урахуванням впливу КП G_o визначається наступним виразом:

$$P_o(r_o, \beta_o, \alpha_o) = G_o K P_{Tx} r_o^{-\eta} e^{\beta_o} \alpha_o. \quad (12)$$

η – показник середніх втрат розповсюдження.

Потужність сигналу $P_i(r_i, \beta_i, \alpha_i)$ з урахуванням впливу КП G_i визначається наступним виразом:

$$P_i(r_i, \beta_i, \alpha_i) = G_i K P_{Tx} r_i^{-\eta} e^{\beta_i} \alpha_i. \quad (13)$$

Підставляючи (12) та (13) в (11), отримуємо вираз P_{SUC} з діаграмоутворенням.

На рис. 2 показана залежність ймовірності успішного радіоприйому з направленими антенами при ймовірності $p=0,5$, SINR $\gamma=10$ dB та параметрах (G_i/G_o) ,

де

DB – діаграмоутворення з попереднім виявленням.

DD – сеанс спрямованої передачі та спрямованого прийому.

DO – сеанс спрямованої передачі та ненаправленого прийому.

RB – випадкове діаграмоутворення.

З аналізу графіків слідує, що ймовірності успішного радіоприйому суттєво підвищується в режимі діаграмоутворення з попереднім виявленням для сеансу направленої передачі і направленого прийому DD.

Висновки.

1. У статті введено поняття тривимірних багатопланових гетерогенних мереж при використанні терагерцового діапазону, запропоновано архітектурні рішення для таких мереж, а також досліджено характеристики зв'язності на прикладі багатопланової гетерогенної мережі.

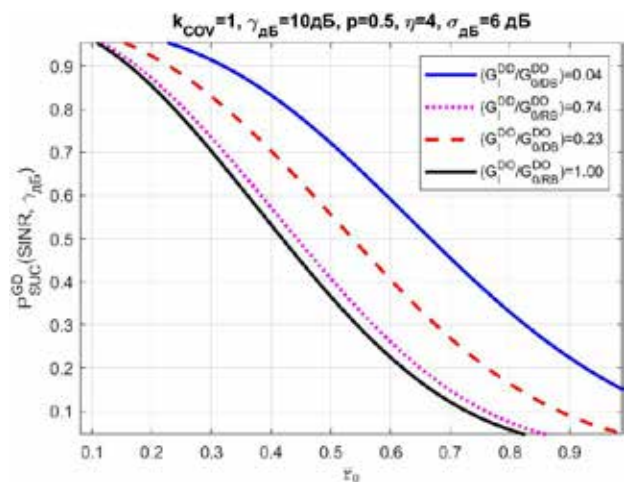


Рис. 2. Ймовірність успішного радіоприйому в режимі діаграмоутворення

2. Отримана модель дозволяє оцінити якість каналу зв'язку шляхом оцінки відношення сигнал шум для вузлів мережі.

3. Розроблена модель описує логічну структуру мережі, що організується в тривимірному просторі, для якої можуть бути застосовані методи, що дозволяють оцінити ймовірність стану зв'язності мережі.

Список літератури:

1. Сайко В.Г., Наритник Т.М., Баховський П.Ф. Модель підвищення показників якості обслуговування гетерогенної мережної інфраструктури терагерцового діапазону. Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського: серія технічні науки. 2023. Т. 34(73). № 1. С.51-56.
2. Saiko Volodymyr, Narytnyk Teodor. High-reliability 5G / IoT mobile communication method when using the terahertz wavelength range. Theoretical and scientific foundations in research in Engineering: collective monograph / Saiko V., Narytnyk T. – etc. – International Science Group. – Boston : Primedia eLaunch, 2022. pp. 477-497. Available at: DOI – 10.46299/ISG.2022.MONO.TECH.1
URL: <https://isg-konf.com/theoretical-and-scientific-foundations-in-research-in-engineering/>
3. Сайко, В., & Наритник, Т. Модель побудови бездротової терагерцової мережі з підвищеною надійністю зв'язку. International Science Journal of Engineering & Agriculture. 2023. 2(2) pp.166 – 181.
4. Сайко В.Г., Одарченко Р.С., Абакумова А.О., Наритник Т.М., Наконечний В.С., Домрачев В.М., Толупа С.В., Заблоцький В.Ю., Баховський П.Ф. Мережі мобільного зв'язку нового покоління 4G/5G/6G: Київ: ТОВ «Про формат», 2021. 200 с.
5. Сайко В.Г., Казіміренко В.Я., Літвінов Ю.М. Мережі бездротового широкопasmового доступу. Навчальний посібник. – К.: ДУТ, 2015. – 196 с
6. 3GPP TS 37.340 V15.2.0: NR: Multi-connectivity; Overall description, Rel. 15 – 2018. URL: https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/37_series/37.340/ (accessed 31.07.2019).
7. T.J.Cui. Electromagnetic information computing and intelligent control. In Proc. Huawei Internal Workshop. Huawei, 2020.
8. Беспроводные сенсорные сети. Б.Я. Лихтциндер – М.: Горячая линия Телеком, 2021. 236 с.
9. Гольдштейн Б.С. Сети связи пост-NGN. СПб: БХВ-Петербург, 2013. 160 с.
10. Абакумов П.А. Алгоритм выбора головного узла кластера сенсорной сети в трехмерном пространстве. Электросвязь. 2014. № 4.
11. C. Huang, G.C. Alexandropoulos, C. Yuen, M. Debbah Indoor signal focusing with deep learning designed reconfigurable intelligent surfaces. Proc. IEEE Workshop on Sig. Proc. Advances in Wireless Commun. (SPAWC) .2019, pp. 1-5.
12. C. Huang, R. Mo, C. Yuen Reconfigurable intelligent surface assisted multiuser MISO systems exploiting deep reinforcement learning. IEEE J. Sel. Area. Commun., 2020. 38 (8) . pp. 1839-1850.
13. Нуриллоев И. Н., Парамонов А. И., Кучерявый А. Е. Метод оценки и обеспечения связности беспроводной сенсорной сети. Электросвязь. 2017. № 7. С. 39–44.

14. Алгоритм Forel. URL: https://studme.org/191776/matematika_himiya_fizik/1343_algoritm_forel (дата звернення 01.04.2023).

15. Фокин Г.А. Моделирование сверхплотных сетей радиодоступа 5G с диаграммообразованием. T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2021. том 15. № 5. С. 4-21.

Saiko V.G., Narytnyk T.M. THREE-DIMENSIONAL MULTILAYER NETWORKS OF TERAHERTZ RANGE

This article is a continuation of the series of articles [1-3] devoted to the development of a model-methodical apparatus for the implementation of a new innovative service for networks of the fifth and subsequent generations – the use of the resource of a local cluster of network infrastructure of the terahertz range with integrated intelligent surfaces (RIS) to ensure the reliability of communication. The task in such a production is relevant and necessary for the ultra-dense wireless networks of the millimeter and terahertz ranges of the new generation.

To solve this problem, a promising trend is the transition to a three-dimensional space for research in the field of such new generation communication networks. At the same time, in the development of scientifically sound methods for planning networks, it is important to have an understanding of their architecture and functioning in three-dimensional space. Since networks using the terahertz wave range are heterogeneous, it is interesting to investigate the joint use of mobile communication networks and RIS networks in three-dimensional space, which is the topic of this article.

The article introduces the concept of three-dimensional multilayer heterogeneous networks using a terahertz frequency range, proposes architectural solutions for such networks, and also studies the probability of successful radio reception using the example of a multilayer heterogeneous network. The obtained model makes it possible to estimate quality of communication channel by estimating ratio of interference signal and ratio of noise signal for network nodes. The use of the model allows us to assert that in a modern multi-storey building, when placing nodes in each room, a wireless communication network can be built using a terahertz wave range, and the quality of the radio channel allows using the maximum data transfer rates achievable for modern standards.

Key words: *mobile communication, terahertz range, transmission blocking, three-dimensional multilayer networks.*

Semenov A.O.

Vinnitsia National Technical University

Semenova O.O.

Vinnitsia National Technical University

Voitsekhovska O.O.

Vinnitsia National Technical University

Khloba A.A.

Vinnitsia National Technical University

Ovcharuk A.O.

Vinnitsia National Technical University

DIAGNOSTIC DEVICE FOR GAS-FILLED DEVICES FOR VISUAL REPRODUCTION OF THE INFORMATION

The discovery of the phenomenon of glow discharge in gases led to active scientific research and gave rise to a large number of technical means that are based on the application of the phenomenon of glow discharge in gases. This type of discharge is used in gas light tubes, daylight lamps, plasma panels, and voltage stabilizers, as well as for obtaining electron and ion beams. Gas-discharge means of visual reproduction of information have also become widely used. A constant high voltage (about 180 V) is required to power them, which can be obtained in various ways, for example, using a classic scheme – a step-down transformer, a diode bridge, and a smoothing filter. Or a circuit with a voltage multiplier on diodes and capacitors. The disadvantage of these options is the need for alternating voltage, which can be obtained either from an alternating current network or by converting a source of direct voltage into alternating voltage using additional electronic circuits. These problems limit the use of the mentioned methods and are not suitable for a mobile and compact version of the device that would provide a quick check of gas-filled devices and preventive restoration of «poisoned» cathodes immediately after their detection. But after the rapid development of chip technology, there are many options for solving these problems, for example, STEP-UP DC voltage converters using microcircuits that operate at high frequencies and can control the charge/discharge process of the choke through power switches. The paper presents the results of the development of a device that uses several STEP-UP converters for powering the indicators and a microcontroller that controls the decoder (which ensures fast scanning of the cathodes of the sign indicators), the power switch (for changing the indicators) and the power supply time. A study of the power change of gas-filled devices with an increase in the power supply voltage of the converter was carried out, and the possibility of restoring «poisoned» cathodes of sign indicators was checked. Experimentally obtained oscillograms of alternating voltage at the control points of the device's electrical circuit.

Key words: gas-filled devices, gas-discharge indicator, glow discharge, poisoned cathodes, voltage booster.

Formulation of the problem. Due to the fact that gas-filled devices could be stored or used in conditions harmful to them, they may not work (gas leakage, disconnection with the cathode, burnout of output pins, «poisoning» of cathodes) [1, 2]. Structural diagrams of diagnostic devices for gas-filled devices for visual reproduction of information can consist of one block (which includes a diode and a limiting resistor, powered directly from an alternating current network), from two or three blocks, they include a step-down transformer, a diode bridge, filters, and a limiting resistor. But these

options do not differ in compactness and functionality because they require an alternating current network; also, the functions of the proposed schemes end on the power supply of the indicators, but the problem with «poisoned» cathodes and the speed of inspection remain. The provision of fast and mobile testing of gas-filled devices with a recovery function is possible only when using a structural circuit with a microcontroller, which accelerates the speed of testing indicators and the user's work with it and the use of step-up DC-DC converters.

Analysis of recent research and publications.

There are already a large number of power supplies for gas-filled devices based on STEP-UP converters, for example [3], a development based on the NE555 timer is proposed, but the timer does not have a temperature-compensated reference voltage source and a generator with an active peak current limiting circuit, unlike the MC34063 microcircuit. There are options based on the classic converter [4, p. 913], but these devices do not offer any functions other than power (for example, increasing the current).

Task statement. The work aims to develop a diagnostic device for gas-filled visual information display devices, both for stationary use and for portable use, which can provide high output voltage and the function of restoring «poisoned» cathodes. To achieve the goal, the following tasks must be solved: 1) propose a compact schematic solution of the voltage converter and the control mechanism; 2) check the layout of the device for compliance with the requirements; 3) draw conclusions about the possibility of reducing the oxide layer by increasing the power of gas-filled devices.

Methods. Figure 1 shows the structural diagram of the diagnostic device.

The electrical diagram of the diagnostic device is shown in Figure 2.

For stationary use, it is advisable to power the diagnostic device from pulsed power supply units, the voltage of which is equal to 9 V DC or higher (up to 12 V). When it is necessary to use the device far from power supply networks, it is advisable to use a built-in power source, for example, a «Krona» battery. To power the decoder and the microcontroller, you need to use the LM7805 stabilizer.

The first units to which the voltage from the power source is supplied are the unit for increasing the supply voltage (it can be implemented using the MT3608 module) and the microcontroller. This module is a step-up converter on the MT3608 microcircuit; this microcircuit has short-circuit protection, overheating protection, output current limitation, and acts as a key. The regulator on the converter board allows you to select the required output voltage level up to 28 V, which is what this module is useful for, with a load current of up to 2 A from a low-voltage power source [5].

The diagnostic device's operation principle is based on the cyclic accumulation and return of energy to the load. At the first moment, when the power transistor is open (it is located in the microcircuit), the choke accumulates energy, then the transistor closes, and through the diode, thanks to the accumulated energy on the choke, voltage is applied to the load and the charge of the capacitor, the transistor opens again, the diode closes, the choke again accumulates potential, and the capacitor at this time feeds the load. When the cycle is repeated, the capacitor is not yet fully discharged, and the output voltages are added. The power transistor opens and closes at high frequencies, resulting in the effect [3]; the maximum output voltage of this module is 28 V DC; in addition to increasing the voltage, we increase the current that we supply to the indicators. This block can be disabled using a toggle switch, then the maximum current recovery mode of the indicators will be smaller.

The next DC-DC step-up converter unit is a power supply unit for indicators. This converter is similar in principle to the previous one but uses a powerful n-channel MOSFET as a control element. The 34063 series of microcircuits is not usually used to control

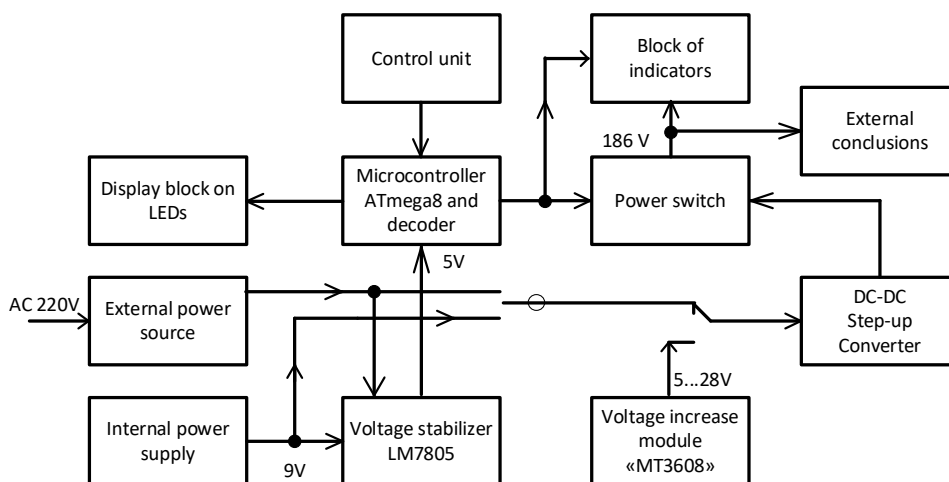


Fig. 1. Structural diagram of the diagnostic device

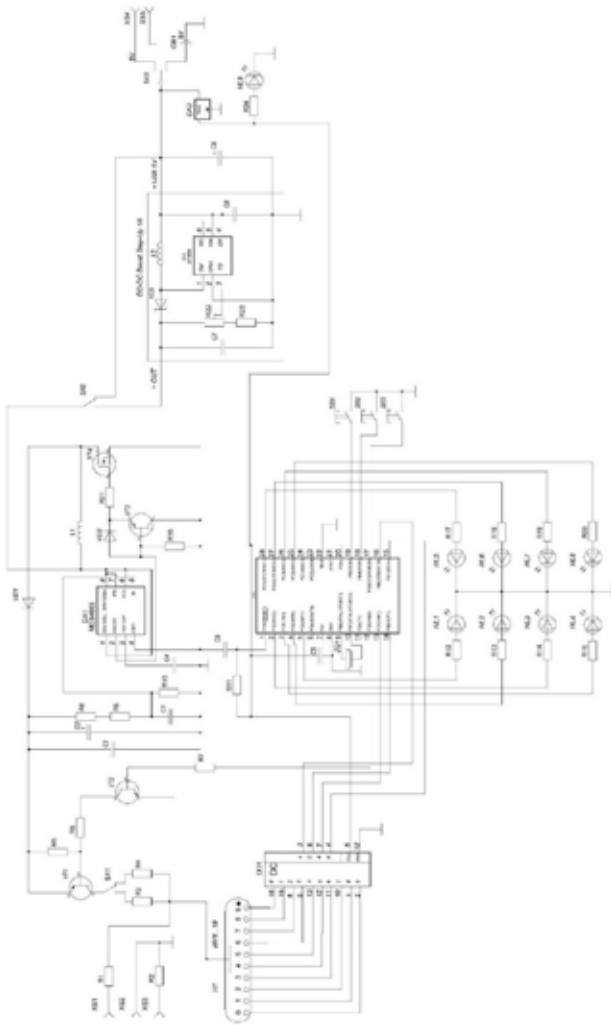


Fig. 2. Electrical diagram of the diagnostic device for gas-filled devices

field-effect transistors because the circuit does not provide for the possibility of discharging the gate of the transistor, but if you add to it a special driver for controlling the field-effect transistor, which consists of a bipolar p-n-p transistor (VT3) with a diode (VD2) and resistors (R16, R21), then this function appears. The scheme is one of the most effective solutions for reducing the turn-off time of the field-effect transistor. With the help of the transistor VT3, capable of conducting large pulse currents, the input capacitance of the MOSFET gate is discharged to its drain [6, pp. 20-21].

MC34063 controls the key; the frequency with which it will open/close the key depends on the divider R8, R9, and capacitor C4. The output voltage is calculated according to the manufacturer's documentation [7, c. 8-14].

Next is the block of the power key on the elements – VT1, VT2, R5, and R6 [8]. They are needed to ensure

the function of turning off the device at the user's request or after the restoration of the indicators is complete. To conditionally control the current that will flow through the indicators, it is necessary to apply two resistors with a small (100 Ohm) and a large (10 kOhm) resistance after VT1. You can connect the resistor using the toggle switch SA1.

The next one is a block with a microcontroller, which, by executing a program programmed into it using AVR Studio [9, c. 46-48], controls the LEDs HL1...HL8 (modes to do – the speed of the cathode bulkhead and the recovery time), the K155ID1 decoder, and the VT2 transistor. Control is carried out by switching one of the buttons SB1, SB2, and SB3 with a common wire. In order to ensure the sequential selection of cathodes, the K155ID1 decoder is used. This decoder is used to convert the binary-decimal code into decimal.

The last block is a block of indicators, which is ten parallel buses, nine of which go to the number depending on the bus number and which the decoder switches in series with the ground when the code is fed to it from the microcontroller and the tenth is the common anode for the lamps, i.e., it is a +186 VDC power bus.

In the Proteus 8 simulator, the operation of the converter was simulated, and oscillograms were recorded (Fig. 3 a, c, d), which confirmed the correctness of the performed electrical calculations and the selected ratings of the radio components of the electrical circuit. A timing capacitor is connected to pin 3 of the microcircuit, which determines the conversion frequency. A semi-driver and a field-effect transistor are connected to pin 2 of the microcircuit. Oscillograms from pin 3 and pin 2 of the chip are shown in Fig. 3, a, c. The duration of the voltage pulses is 27 μ s; the frequency is 37 kHz; that is, the microcircuit works without failures.

We made an experimental sample of the device and examined the voltage oscillograms at the control points. The sawtooth voltage from pin 3 of the microcircuit is shown in Fig. 3.b (cell scale on the X axis is 10 μ s, on the Y axis is 0.5 V), and the repetition frequency is 43 kHz. The shape of the signal that enters the gate of the field capacitor is shown in Fig. 3.g (cell scale on the X axis – 5 μ s, on the Y axis – 1 V), frequency 43kHz. The form of the inductance discharge voltage (Fig. 3, e), at the output of the field-effect transistor, was investigated using a probe-divider 1:10 (one cell along the X axis – 5 μ s, along the Y axis – 5V), frequency 43 kHz.

During the simulation, the frequency was lower than the calculations made according to the

manufacturer's documentation (37 kHz); on the model, the frequency is 43 kHz. Also, the voltage forms are slightly different. This is due to the parasitic capacitances of the experimental layout, as well as the spread of the nominal values of the radio components.

An important function of the device was the introduction of restoration of «poisoned» cathodes of indicators by supplying increased power. The voltage measurement results on the experimental layout in different modes of the diagnostic device are shown in Fig. 4.

The change in power of different types of gas discharge indicators in normal mode and recovery mode with and without using the Step-UP converter module is considered (the values of currents and voltages are taken from the average indicator, and the converter increases the voltage by 3 V). The voltage in the idle mode is 186.3 V. Figure 5 shows the graph of the obtained results for increasing the power of various types of indicators. The obtained results indicate that the mode of operation with the previous Step-UP converter is in good working order. An example of restoring part of the «poisoned» cathode of the indicator is shown in Figure 6.

Conclusions. Powering the indicators is implemented using DC-DC step-up voltage converters, which with small dimensions and input voltages, can provide a voltage sufficient to create a glow discharge in the indicator.

Device control is implemented on the Atmega8 8-bit microcontroller, which made it possible to develop a fairly large number of tester functions, in particular, the ability to control the speed or time of operation of the device in recovery and testing modes. The operating mode can be determined using a panel of LEDs controlled by a microcontroller. The microcontroller unit is controlled using three buttons: Start/Stop, Changing the frequency, and Changing the working time. In addition to the microcontroller, a pair of toggle switches was used to switch the device to high voltage and high current mode (cathode recovery mode).

Practical studies show that the recovery mode works correctly in two modes (increased power

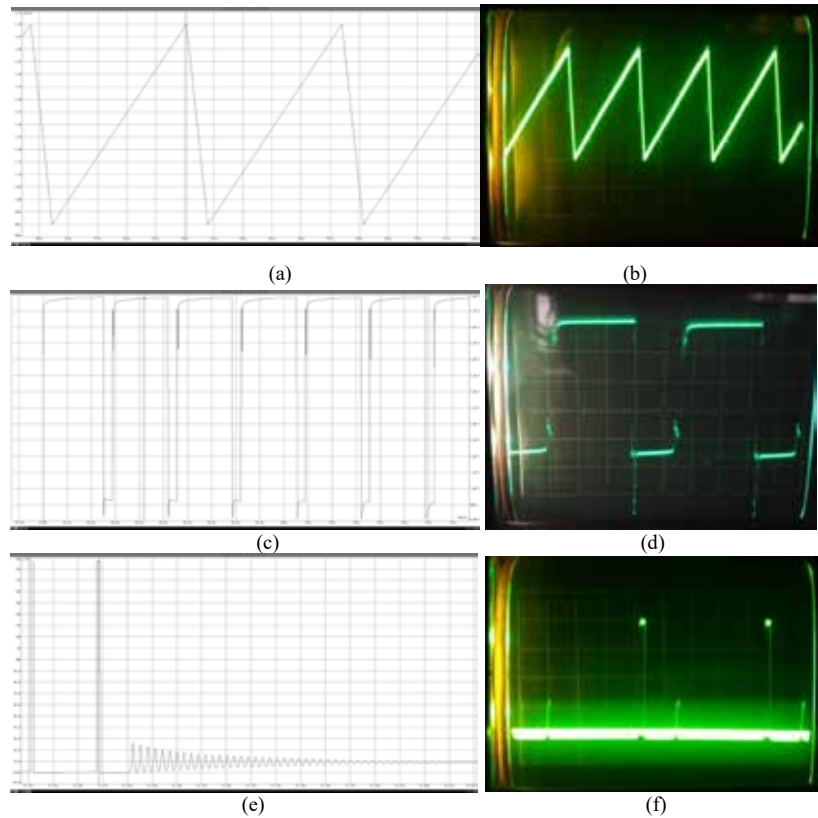


Fig. 3. Oscillogram from pin 3 of the microcircuit (a, b), the pulses from which are sent to the gate (c, d), and the oscillogram of the inductance discharge when the field-effect transistor is closed (e, f)

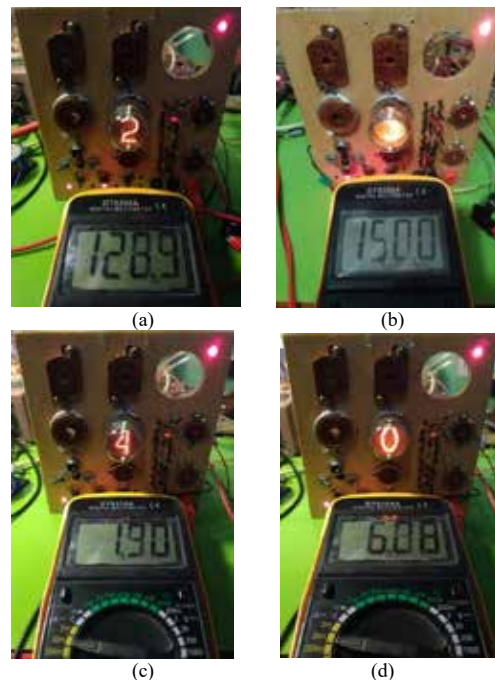


Fig. 4. Results of voltage measurement on the experimental layout in different modes of the diagnostic device: voltage at load 128.9 V (a), the voltage at load in a recovery mode 150 V (b), current not in recovery mode 1.9 mA (c), current in recovery mode 6.08 mA (g)

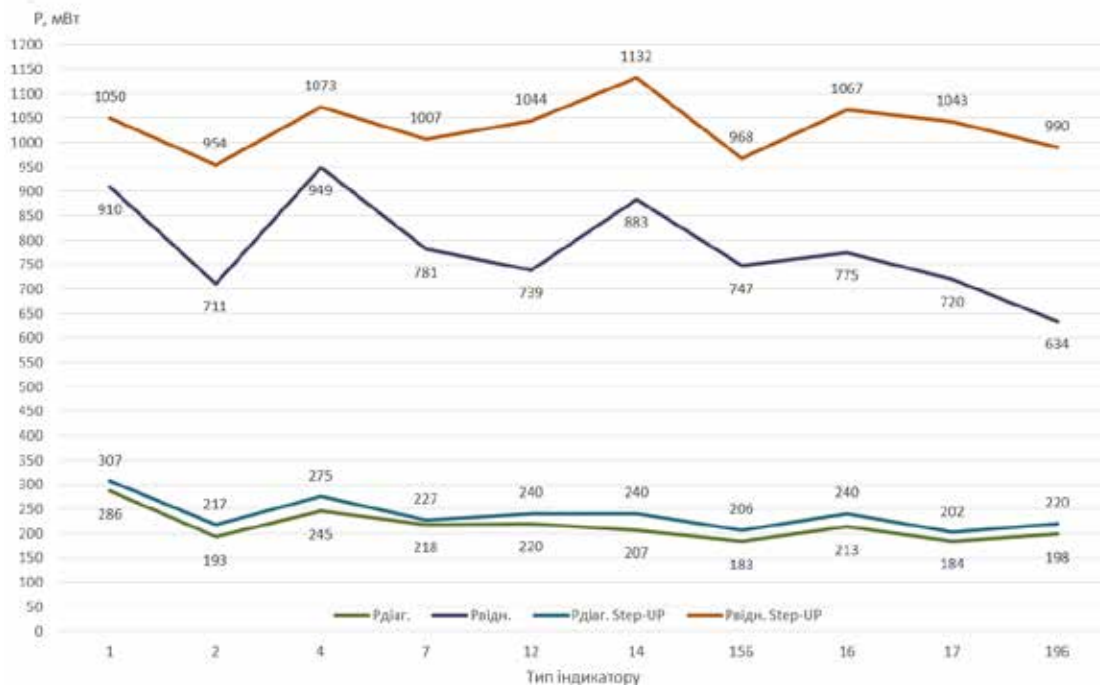


Fig. 5. Power change graph in different operating modes of the diagnostic device



Fig. 6. Partially «poisoned» cathode (a), cathode of the indicator after recovery with increased current (b)

compared to the normal diagnostic mode). A slight increase in the voltage on the Step-UP converter gives a power increase of 250 mW. A further increase in voltage will lead to many times exceeding the allowable current through the indicator, so it is suggested to leave the supply voltage at most 12 V.

With the diagnostic device proposed in work, it is possible to check not only the types of gas-filled devices for which there are panels on the body but also various types of indicators, the supply voltage of which is in the range from 160 to 200 V direct current. This is implemented with the help of three output wires – anode, cathode, and auxiliary cathode.

Bibliography:

1. Крушевський Ю. В. Шутило М. А. Семенов А. О. Коваль К. О. Настроювання, регулювання та обслуговування РЕА. Навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ, 2015. 160 с.
2. Tutorial: Cathode Poisoning Reversal URL: <http://surl.li/ftxed> (дата звернення: 15.03.23).
3. Build a nixie power supply URL: https://www.ledsales.com.au/kits/nixie_supply.pdf (дата звернення: 17.03.23).
4. Ulrich T., Christoph S., Eberhard G. Electronic Circuits: Handbook for Design and Application, Laszlo-Balogh, 2015, pp. 913-914.
5. DATASHEET: Документація виробника мікросхеми MT3608. URL: <http://surl.li/ftxfi> (дата звернення: 19.03.23).
6. Laszlo B. Fundamentals of MOSFET and IGBT Gate Driver Circuits. Texas Instruments. URL: <http://surl.li/fwrfx> (дата звернення: 20.03.23).
7. ON Semiconductor AN920/D. Theory and Operation of the MC34063 and A78S40. URL: <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/AN920-D.PDF> (дата звернення: 21.03.23).
8. Valerio Nappi Parte 2ter: i VJT e i driver delle nixie URL: <http://www.valerionappi.it/parte-2ter/> (дата звернення: 22.03.23)
9. Цирульник С.М., Азаров О.Д., Крупельницький Л.В., Трояновська Т.І. Програмування мікроконтролерів AVR : навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ, 2018. 111 с. С. 46-48.

Семенов А.О., Семенова О.О., Войцеховська О.О., Хльоба А.А., Овчарук А.О.
**ДІАГНОСТИЧНИЙ ПРИСТРІЙ ДЛЯ ГАЗОНАПОВНЕНИХ ПРИЛАДІВ
ВІЗУАЛЬНОГО ВІДТВОРЕННЯ ІНФОРМАЦІЇ**

Відкриття явища тліючого розряду у газах привело до активних наукових досліджень та породило велику кількість технічних засобів, які ґрунтуються на застосуванні явища тліючого розряду у газах. Цей тип розряду використовується в газосвітних трубках, лампах денного світла, плазмових панелях, стабілізаторах напруги, а також для отримання електронних та іонних пучків. Широкого використання набули також газорозрядні засоби візуального відтворення інформації. Для їх живлення необхідна висока постійна напруга (порядку 180 В), яку можна отримати різними способами, наприклад використовуючи класичну схему – понижувальний трансформатор, діодний міст, згладжуваний фільтр. Або схему з помножувачем напруги на діодах і конденсаторах. Недоліком цих варіантів є потреба в змінній напрузі, яку можна отримати або від мережі змінного струму, або перетворивши джерело постійного напруги в змінну напругу використовуючи додаткові електронні схеми. Ці проблеми обмежують використання зазначених способів і не підходять для мобільної та компактної версії приладу який би забезпечив швидку перевірку газонаповнених приладів та профілактичне відновлення «отруєних» катодів відразу після їх виявлення. Але після бурхливого розвитку мікросхемотехніки з'явилося багато варіантів вирішення цих проблем, наприклад STEP-UP перетворювачі постійної напруги з використанням мікросхем, які працюють на високих частотах і можуть керувати процесом заряду/розряду дроселя через силові ключі. У роботі наведено результати розробки пристрою що використовує декілька STEP-UP перетворювачів для живлення індикаторів і мікроконтролер, який керує дешифратором (що забезпечує швидкий перебір катодів знакових індикаторів), ключом живлення (для зміни індикаторів) та часом подачі живлення. Було виконано дослідження зміни потужності газонаповнених приладів при збільшенні напруги живлення перетворювача, перевірена можливість відновлення «отруєних» катодів знакових індикаторів. Експериментально отримані осцилограми змінної напруги у контрольних точках електричної схеми приладу.

Ключові слова: газонаповнені прилади, знаковий індикатор, тліючий розряд, отруєні катоди, STEP-UP перетворювач.

Цяпа С.М.

Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз
Служби безпеки України

КОМПЛЕКСНА МЕТОДИКА ЗАХИСТУ ІНФРАСТРУКТУРИ МЕРЕЖІ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ 5G

Проведено аналіз потенційних загроз неавторизованого доступу, несанкціонованого внесення змін у набори потокових даних, блокування функцій програмної платформи та контроль інформаційного каналу, що мають бути враховані при побудові стратегії захисту інфраструктури мережі мобільного зв'язку 5G. Зазначено, що складність задачі пов'язана з багаторівневою структурою мережі, що включає у себе необхідність визначення загроз на рівні мобільного пристрою користувача, радіоінтерфейсу, граничної мережі, транспортної мережі зв'язку, основного домену та зовнішніх інформаційних вузлів. Запропонована комплексна методика захисту відповідних рівнів інфраструктури, що включає у себе організацію програмно-конфігурованої мережі, застосування алгоритмів на основі віртуалізації мережевих функцій та впровадження квантових каналів розподілу ключів шифрування. У результаті дослідження було визначено ефективність захисту інфраструктури від (i) програм-ботів, атаки посередника, DOS/DDoS-атаки, внесення змін у код програмних додатків, втручання у роботу апаратно-програмної платформи, впровадження шкідливого програмного забезпечення; (ii) радіоглушіння, атаки посередника та перехоплення трафіку на рівні радіоінтерфейсу; (iii) загроз для архітектури граничних обчислень з множинним доступом, включення зловмисниками додаткових інформаційних вузлів, атаки побічного каналу, а також проблем з контролем доступу та аутентифікацією на рівні граничної мережі; (iv) DOS/DDoS-атаки, втручання у набір даних користувача, загроз для архітектури граничних обчислень з множинним доступом на рівні транспортної мережі зв'язку; (v) загроз пов'язаних з застосуванням прикладного програмного інтерфейсу і поділення мережі, віртуалізацією апаратних ресурсів, DOS/DDoS-атаки, неавторизованого доступу на рівні основного домену; (vi) вразливостей зовнішніх апаратних ресурсів і програмних додатків хмарних сервісів, програм-ботів, загроз пов'язаних з застосуванням прикладного програмного інтерфейсу і включенням у загальну мережу роумінг-партнерів на рівні зовнішніх інформаційних вузлів.

Ключові слова: мережі мобільного зв'язку 5G, стратегія захисту, квантовий розподіл ключів, хмарні сервіси, граничні обчислення, віртуалізація мережевих функцій, програмно-конфігурована мережа.

Вступ

Широкі функціональні можливості мережі мобільного зв'язку 5G зумовлюють складність відповідної архітектури [1-5], що включає у себе інфраструктуру базових станцій та центрів обробки даних, вузли ретрансляторів, організовані відповідно протоколів радіозв'язку, інформаційні вузли мобільних пристроїв користувачів мережі, а також сторонні сервіси, що використовуються при обробці потокових даних. Водночас дослідники зазначають, що на кожному з рівнів мережі існує високий ризик проведення кібератаки з метою перехоплення даних користувача та провайдера з метою їх нелегального використання або внесення несанкціонованих змін, а також порушення стабільної роботи інформаційних каналів і сервісів обробки даних [6, 7]. Таким чином, організація мережі мобільного зв'язку 5G має включати у себе комплексний аналіз можливих сценаріїв реалізації

кібератак та впровадження системи захисту, налаштування якої відбувається відповідно показників ефективності виявлення загроз, навантаження на обчислювальний ресурс апаратно-програмної платформи та необхідності роботи у режимі реального часу. Важливість виконання зазначених вимог при цьому вказує на **актуальність задачі** розробки універсальної схеми, що складається з мінімального набору алгоритмів, об'єднання яких надасть можливість протидіяти повному спектру потенційних загроз.

Як показав **аналіз наукових досліджень** присвячених проблемам захисту розширеної інфраструктури мережі мобільного зв'язку 5G на всіх рівнях, що були вказані вище, високою ефективністю характеризується впровадження архітектури програмно-конфігурованої мережі (SDN: Software Defined Networks) та віртуалізації мережевих функцій (NFV: Network Function

Virtualizations), що має бути враховано при розробці стратегії захисту [8-14]. Відповідні підходи є надзвичайно гнучкими можуть бути застосовані для багатьох типів архітектури каналів передачі даних мережі радіозв'язку, як то схемах «множинні входи і множинні виходи» (MIMO: Multiple-Input Multiple-Output), при неортогональному множинному доступі (NOMA: Non-Orthogonal Multiple Access), у мережі безпосередньої передачі між парами складових (D2D: Device-to-Device), а також при застосуванні процедури розшарування мережі (NS: Network Slicing). Також можна вказати, що активне застосування хмарних сервісів надає можливість застосувати систему квантових обчислень, зокрема, налаштувати квантовий розподіл ключів шифрування (QKD: Quantum Key Distributed) і побудувати багаторівневу систему аутентифікації з квантовими каналами [15-20]. При цьому можна вказати на необхідність побудови цілісної методології захисту мережі мобільного зв'язку 5G від зовнішніх загроз, що базується на SDN, NFV, а також включенні у інфраструктуру мережі квантових каналів та платформи квантових обчислень, і протоколів, що забезпечують виконання стандартів політики конфіденційності, з мінімізацією навантаження на обчислювальний ресурс апаратно-програмної платформи та часу обробки потокових даних, що розглядається як *невирішена частина загального дослідження*.

Таким чином, *метою роботи* стала побудова та оцінка відповідно цільових показників ефективності комплексної методики організації мережі мобільного зв'язку 5G, що забезпечує повний захист її функціональних складових на рівні мобільного пристрою користувача, радіоінтерфейсу, граничної мережі, транспортної мережі зв'язку, основного домену та зовнішніх інформаційних вузлів.

1. Методика захисту інфраструктури мережі шляхом організації SDN, впровадження NFV та налаштування QKD

Як було вказано вище, сучасна парадигма ефективного функціонування та захисту мережевих компонент полягає у їх віртуалізації. При організації SDN проводиться віртуалізація обчислювальних ресурсів апаратної платформи сервісу, управління якими надалі здійснюється централізовано згідно з таблицями маршрутизації у рамках однієї операції відповідно до заданого стандарту OpenFlow або його аналогів [8-14]. Це надає можливість ефективно визначити вразливі вузли мережевої інфраструктури, налаштувати захист системи від загроз пов'язаних

з перевантаженням внаслідок кібератак або пікових навантажень при обробці потокових даних, а також загроз контролю зловмисниками окремих інформаційних каналів і вузлів. При цьому, впровадження NFV надає можливість провести процедуру віртуалізації класів функцій мережевих вузлів через об'єднання та поділення груп котрих проводиться оптимізація та масштабування структури програмної платформи сервісу. Функція віртуальної мережі (VNF: Virtualized Network Function) застосовується для комплексу віртуальних машин, відповідно яких централізовано обирається програмне забезпечення, що спрощує розгортання, налаштування та модифікацію програмної платформи, а також системи забезпечення стабільної роботи комплексу відповідно балансування навантаження і реагування на зовнішні загрози у режимі реального часу [8-14]. Це надає можливість збільшити гнучкість керування мережевою інфраструктурою та зменшити загальний кошторис її експлуатації.

Своєю чергою, впровадження у інфраструктуру мережі мобільного зв'язку 5G квантових каналів з метою налаштування QKD надає можливість досягти максимального рівня ефективності шифрування, при якій перехоплення потокових даних можливо лише за умов повного контролю як інформаційного, так і квантового каналу з боку зловмисника. Відповідно до базової схеми, представленій на рис. 1, розподіл ключа шифрування між двома інформаційними вузлами «X» і «Y» відбувається на базі як квантового, так і класичного інформаційного каналу відповідно до наступного алгоритму:

1. На інформаційному вузлі «A» формується випадкова бітова послідовність ключа шифрування $\{x_i\}$ де кількість $i \in [1; I]$ фіксованою.

2. На інформаційних вузлах «A» і «B» незалежно один від одного для кожного елемента послідовності $\{x_i\}$ випадковим чином обирається базис квантового стану, що складають бітові послідовності $\{a_i\}$ $\{b_i\}$ відповідно, де $i \in [1; I]$ На інформаційному вузлі «A» бітова послідовність ключа шифрування $\{x_i\}$ одується через квантові стани елементарних частинок відповідно базису $\{a_i\}$ передається на інформаційний вузол «B», де зчитується відповідно базису $\{b_i\}$

3. Зважаючи на те, що зчитування квантового стану i а інформаційному вузлі «B» може відбуватись лише при збігу станів a_i а b_i у процесі зчитування бітова послідовність $\{x_i\}$ корочується до бітової послідовності $\{y_j\}$ де $j \in [1; J]$, причому $J \ll I$

4. Для того, щоб на інформаційному каналі «А» можна було здійснити перехід $\{x_i\} \rightarrow \{y_j\}$ з каналу «В» через класичний інформаційний канал передається бітова послідовність $\{b_i\}$ що надає можливість визначити значення i , для яких бази не збігаються, і видалити з бітової послідовності $\{x_i\}$ відповідні значення x_i .

За умови перехоплення зловмисником даних квантового каналу стани частинок зміняться, що порушить процедуру розподілу ключів і цей факт буде зафіксовано системою захисту. Своєю чергою, перехоплення набору $\{b_i\}$ рамках стандартного інформаційного каналу без наборів $\{a_i\}$ $\{x_i\}$ е надає зловмиснику можливість перехопити жоден з елементів послідовності $\{y_j\}$ навіть визначити їх загальну кількість J . Таким чином, при регулярному виконанню процедури оновлення ключа шифрування і відсутності можливості повного контролю зловмисником обох каналів відповідний канал передачі даних можна вважати повністю захищеним.

2. Визначення зовнішніх загроз багаторівневої структури мережі мобільного зв'язку 5G

Для визначення зовнішніх загроз багаторівневої структури мережі мобільного зв'язку 5G необ-

хідно провести формалізацію рівнів інфраструктури, інформаційні вузли та канали яких можуть бути використані при проведенні атаки з боку зловмисника. Відповідно до проведеної у рамках дослідження класифікації були виділені наступні потенційні загрози мережевої інфраструктури (рис. 2):

- загрози на рівні мобільних пристрів користувачів (DAS: Device Attack Segment), які представляють собою окремі інформаційні вузли з окремими апаратно-програмними платформами і програмними додатками, що характеризують їх вразливість до зовнішньої атаки;
- загрози на рівні радіоінтерфейсу (AI-AS: Air Interface Attack Segment) мережі мобільного зв'язку;
- загрози на рівні граничної мережі (EN-AS: Edge Network Attack Segment) як частини інфраструктури мережі мобільного зв'язку, обчислювальний ресурс та положення інформаційних вузлів якої дозволяє зменшити навантаження на головні сервери та відповідні інформаційні канали при обробці запитів користувачів;
- загрози на рівні транспортної мережі зв'язку (BH-AS: Backhaul Attack Segment), як частини

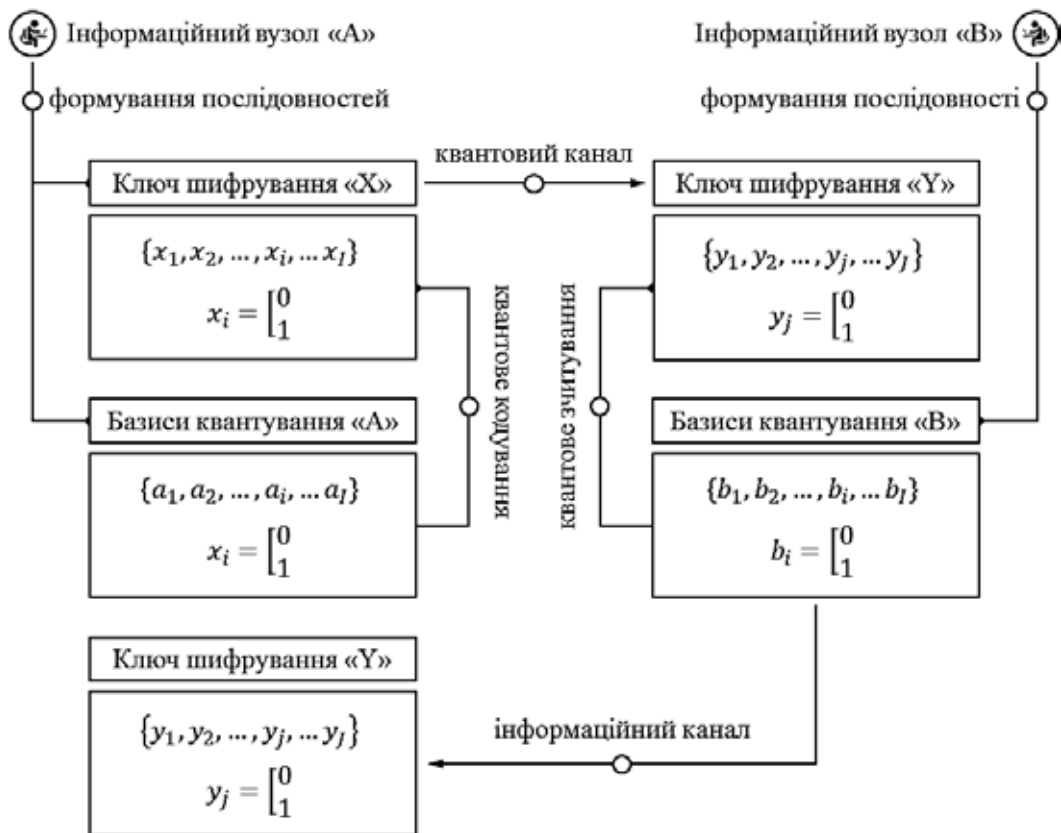


Рис. 1. Узагальнена схема квантового розподілу ключів між інформаційними вузлами «А» і «В»

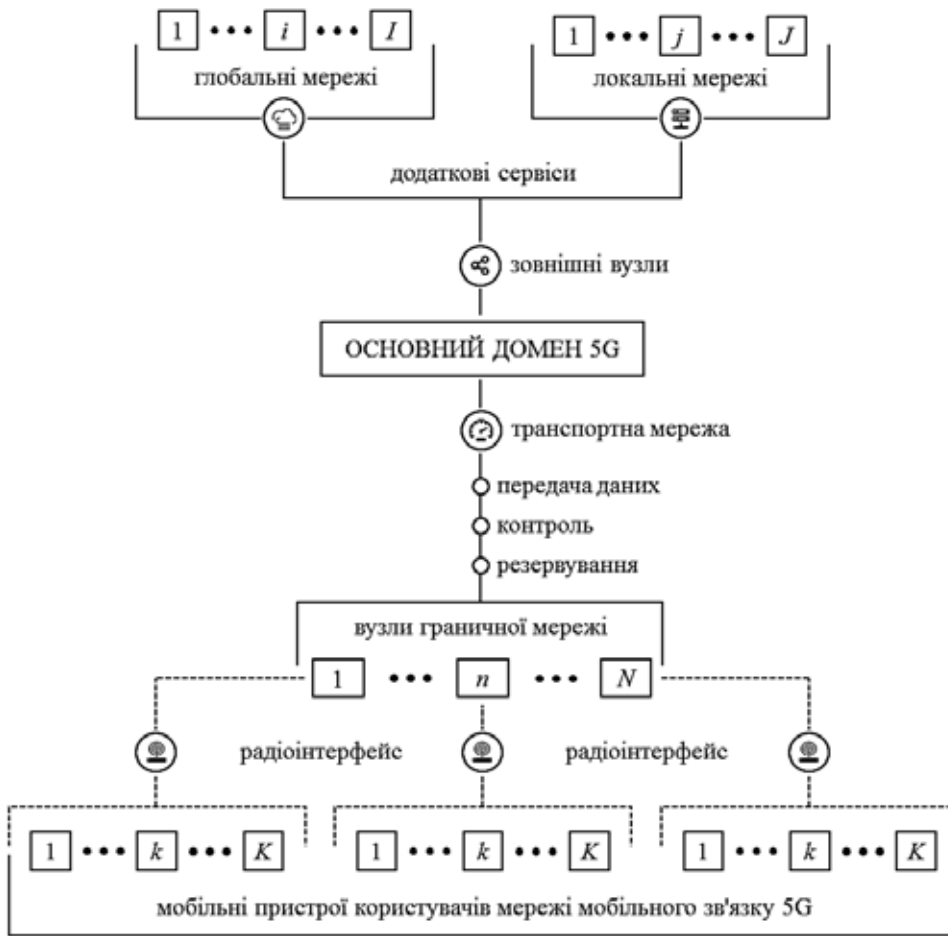


Рис. 2. Діаграма рівнів загроз інфраструктури мережі мобільного зв'язку 5G

інфраструктури мережі мобільного зв'язку, що забезпечує передачу, контроль та резервування поточкових даних, які передаються до базової станції;

- загрози на рівні основного домену 5G (5GC-AS: 5G Core Network Attack Segment), що виступає як центральний сегмент мережі, який організує роботу всього комплексу мережі мобільного зв'язку відповідно базових протоколів та політики конфіденційності;

- загрози на рівні зовнішніх по відношенню до основної інфраструктури мережі радіозв'язку інформаційних вузлів (EN-AS: External Network Attack Segment), що надає можливість включити сервіси додаткових локальних і глобальних мереж.

Для побудови та оцінки ефективності методики організації мережі мобільного зв'язку 5G, що забезпечує захист інформаційних каналів і вузлів необхідно провести аналіз загроз на кожному з рівнів та визначити які з них можуть бути вирішені методами організації SDN, впровадження NFV та налаштування QKD, а також через застосування хмарних сервісів захисту.

2.1. Визначення загроз на рівні мобільних пристроїв користувачів

Рівень мобільних пристроїв користувачів є найбільш складним для прогнозування у рамках мережі мобільного зв'язку 5G. На зазначеному рівні кожен з пристроїв є інформаційним вузлом, апаратний ресурс, програмні платформи і додатки якого не можуть бути надійно оцінені, причому зміни у параметрах інформаційних вузлів та їх кількості відбуваються неконтрольовано. Важливо, що користувачі не є персоналом мережі, його поведінка може несвідомо або свідомо порушувати її роботу. Типові загрози на цьому рівні складають наступний набір:

- впровадження шкідливого програмного забезпечення та, зокрема, програм-ботів, що працюють у фоновому режимі та надають можливість встановити зовнішній контроль над функціями пристрою;

- внесення зловмисником змін у код програмних додатків, встановлених користувачем на мобільному пристрої;

- атака посередника при якій зловмисник повністю контролює інформаційний канал між інформаційними вузлами «А» і «В», і має змогу представляти для користувача «А» користувачем «В», а для користувача «В» користувачем «А»;
- розподілені атаки типу DOS/DDoS через насичення інформаційного вузла великою кількістю зовнішніх запитів з однієї або декількох IP-адрес.

Таблиця 1

Протидія потенційним загрозам інфраструктурі мережі мобільного зв'язку 5G на рівні мобільних пристроїв користувачів

	Політика конфіденційності	Організація системи захисту			
		SDN	NFV	QKD	CPS
Шкідливе програмне забезпечення та боти	+	+	×	×	×
Зміни у кодї програмних додатків користувача	+	×	×	×	×
Атака посередника	+	+	×	×	×
DOS/DDoS-атака	+	+	+	×	+

У табл. 1 (позначка «+» відповідає високій значимості елементу системи захисту, а позначка «×» відповідає низькій значимості елементу системи захисту) показано, що значна кількість задач вирішується через дотримання політики конфіденційності, а для стабільної роботи за умов загрози DOS/DDoS-атак і фонових програм-ботів ефективно використовується віртуалізація компонент через організацію SDN, впровадження NFV та налаштування QKD, а також через застосування хмарних сервісів захисту (CPS: Cloud Protection Service).

2.2. Визначення загроз на рівні радіоінтерфейсу

Своєю чергою, загрози при передачі даних на рівні радіоінтерфейсу полягають у неможливості контролю інформаційного каналу бездротового зв'язку. Відповідно можливості перехоплення даних, блокування інформаційного каналу, та впровадження у інформаційний канал вузла зловмисника, загрози можуть бути поділені на наступні групи:

- радіоглушіння сигналу радіомережі через передачу радіосигналів, які порушують передачу даних;

- перехоплення трафіку радіомережі між мобільним пристроєм і ретранслятором, а також між ретранслятором та базовою станцією;
- атака посередника, що виконується аналогічно до того, як було описано у попередньому підрозділі.

Таблиця 2

Протидія потенційним загрозам інфраструктурі мережі мобільного зв'язку 5G на рівні радіоінтерфейсу

	Політика конфіденційності	Організація системи захисту			
		SDN	NFV	QKD	CPS
Радіоглушіння сигналу радіомережі	×	+	×	+	×
Перехоплення трафіку радіомережі	+	+	×	+	×
Атака посередника	+	×	+	×	×

Як можна побачити у табл. 2 відповідні загрози цілком вирішуються через дотримання політики конфіденційності та впровадження SDN і NFV. Також на цьому етапі для захисту трафіку застосовується підхід по дублюванню інформаційних каналів квантовими, що, як було зазначено вище, не вирішує лише потенційну загрозу атаки посередника.

2.3. Визначення загроз на рівні граничної мережі

Гранична мережа є частиною інфраструктури мережі мобільного зв'язку, інформаційні вузли якої дозволяють зменшити навантаження на головні сервери та інформаційні канали при обробці запитів користувачів, що зумовлює широкий набір загроз на рівні EN-AS:

- вразливості архітектури граничних обчислень з множинним доступом (MEC: Multi-Access Edge Computing), що забезпечують ьінформаційні канали доступу до хмарних сервісів з метою збільшення ефективності обробки запитів користувачів;
- включення у структуру мережі інформаційних вузлів зловмисників (RNT: Rouge Nodes Threats), на рівні яких здійснюється як перехоплення даних користувачів, так і внесення несанкціонованих змін;
- вразливості системи аутентифікації;
- атака побічного каналу (SCA: Side Channel Attacks), що базується на аналізі зловмисником особливості функціонування інфраструктури граничної мережі;
- вразливість неналежного контролю доступу (IAC: Improper Access Control) при якій протоколи

безпеки через помилки у специфікаціях доступу або неефективність відповідних алгоритмів надають зловмиснику доступ до окремих блоків даних або функцій граничної мережі.

Таблиця 3

Протидія потенційним загрозам інфраструктурі мережі мобільного зв'язку 5G на рівні граничної мережі

	Політика конфіденційності	Організація системи захисту			
		SDN	NFV	QKD	CPS
Вразливості архітектури MEC	×	+	+	×	×
Інформаційні вузли зловмисників	+	+	+	+	×
Вразливості системи аутентифікації	+	×	×	×	×
Атака побічного каналу	×	+	×	×	×
Неналежний контроль доступу	+	+	+	×	+

На даному рівні також більшість проблем вирішуються через належне налаштування інфраструктури мережі через впровадження SDN і NFV (табл. 3). При цьому QKD використовується для запобігання появи інформаційних вузлів зловмисників, включених у структуру мережі, а хмарні сервіси для виявлення неналежного доступу у систему при недотриманні персоналом політики конфіденційності.

2.4. Визначення загроз на рівні транспортної мережі зв'язку

Транспортна мережа зв'язку як частини загальної інфраструктури мережі забезпечує передачу, контроль та резервування поточкових даних і характеризується наступним набором потенційних загроз:

- розподілені атаки типу DOS/DDoS через насичення інформаційного вузла великою кількістю зовнішніх запитів з однієї або декількох IP-адрес;
- контроль і перехоплення поточкових даних користувача (CUPS: Control and User Plane Sniffing);
- вразливості архітектури транспортної мережі зв'язку з множинним доступом (Backhaul MEC);
- кібератака, що базується на внесенні змін у потік керування (FMA: Flow Modification Attacks).

Таблиця 4

Протидія потенційним загрозам інфраструктурі мережі мобільного зв'язку 5G на рівні транспортної мережі зв'язку

	Політика конфіденційності	Організація системи захисту			
		SDN	NFV	QKD	CPS
Розподілені атаки типу DOS/DDoS	×	×	+	×	×
Контроль і перехоплення поточкових даних	+	×	+	+	×
Вразливості MEC	×	×	+	+	×
Внесення змін у потік керування	×	×	×	×	+

Як можна побачити з таблиці 4 на рівні транспортної мережі зв'язку вже активно використовуються квантові канали, у той час як значення організації SDN та застосування хмарних сервісів є мінімальним.

2.5. Визначення загроз на рівні основного домену

Загрози на рівні основного домену 5G, що виступає як центральний сегмент мережі, який організує роботу всього комплексу апаратно-програмних платформ інформаційних вузлів мережі мобільного зв'язку, відповідно базових протоколів та політики конфіденційності включає у себе наступні категорії:

- вразливості програмного забезпечення домену 5GC;
- вразливості прикладного програмного інтерфейсу (API: Application Programming Interface), що включає у себе роботу з протоколами взаємодії з апаратними компонентами, виконання програмних алгоритмів з функціонування операційних систем;
- вразливості на рівні виконання процедури розшарування мережі на віртуальні зі спільним мережевим доменом, а також інші підходи по віртуалізації, що є особливістю саме стандарту 5G;
- розподілені атаки типу DOS/DDoS через насичення інформаційного вузла великою кількістю зовнішніх запитів з однієї або декількох IP-адрес;
- несанкціонований контроль доступу (IAC: Improper Access Control) до інфраструктури 5GC.

Як показано у табл. 5 на зазначеному рівні не використовуються квантові канали через те що не відбувається передача даних, але високу ефективність показує налаштування SDN і NFV, а також виявлення зовнішніх атак у режимі реального часу з застосування хмарних сервісів.

Таблиця 5
Протидія потенційним загрозам інфраструктурі мережі мобільного зв'язку 5G на рівні основного домену

	Політика конфіденційності	Організація системи захисту			
		SDN	NFV	QKD	CPS
Вразливості програмного забезпечення домену 5GC	×	×	×	×	+
Вразливості API	×	+	×	×	×
Вразливості віртуалізації	×	+	+	×	+
Розподілені атаки типу DOS/DDoS	×	+	+	×	+
Несанкціонований контроль доступу	+	×	×	×	+

2.6. Визначення загроз на рівні зовнішніх інформаційних вузлів

Нарешті, виявлення загроз на рівні зовнішніх по відношенню до основної інфраструктури мережі радіозв'язку інформаційних вузлів також є складною задачею, що пов'язано з тим, що у даному випадку здійснюється аналіз апаратно-програмних платформ інформаційних вузлів, над якими у провайдера немає повного контролю. У рамках дослідження запропонована наступна класифікація для категорій зовнішніх загроз:

- вразливості апаратної платформи серверних комплексів;
- вразливості хмарного сервісу, що представляють послуги платформи;
- кібератаки з застосуванням програм-ботів
- вразливості програмного забезпечення серверних комплексів;
- вразливості прикладного програмного інтерфейсу (API);
- вразливості на рівні роумінг-партнерів, які надають послуги користувачам мережі на основі угод про роумінг.

Як показано у табл. 6 на зазначеному рівні також не використовуються квантові канали через те що відповідні інформаційні канали виходять за межі інфраструктури мережі мобільного зв'язку 5G. Найбільшу ефективність показує належне виконання політики конфіденційності та налаштування SDN і NFV. Використання послуг хмарних сервісів застосовується при компенсації вразливостей, що виникають при взаємодії роумінг-партнерами.

Список літератури:

1. Behera J. R. Application of CR technique in 5G network: A smart city perspective. *Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems*. 2020. Vol. 12, No SP7. P. 2383–2388. DOI: <https://doi.org/10.5373/jardcs/v12sp7/20202366>.

При цьому слід зазначити, що на цьому рівні, так само як і на попередніх, виконання політики конфіденційності з налаштуванням SDN і NFV з включенням у окремих випадках QKD і CPS дозволяють забезпечити повний захист від потенційних зовнішніх загроз, що надає можливість розглядати представлену методіку як універсальну стратегію захисту інфраструктури мережі мобільного зв'язку 5G.

Таблиця 6
Протидія потенційним загрозам інфраструктурі мережі мобільного зв'язку 5G на рівні зовнішніх інформаційних вузлів

	Політика конфіденційності	Організація системи захисту			
		SDN	NFV	QKD	CPS
Вразливості апаратної платформи	+	×	×	×	×
Вразливості хмарного сервісу	+	×	×	×	×
Кібератаки програм-ботів	+	+	×	×	×
Вразливості програмного забезпечення	+	×	×	×	×
Вразливості API	×	+	×	×	×
Вразливості на рівні роумінг-партнерів	×	+	+	×	+

Висновки

У результаті проведеного дослідження було проаналізовано особливості побудови комплексної методіки організації мережі мобільного зв'язку 5G, що забезпечує повний захист складових мережі на рівні мобільного пристрою користувача, радіоінтерфейсу, граничної мережі, транспортної мережі зв'язку, основного домену 5GC та зовнішніх по відношенню до основної мережі інформаційних вузлів.

При цьому у рамках дослідження було проведено:

- узагальнення схеми квантового розподілу ключів між інформаційними вузлами;
- визначення рівнів загроз інфраструктури мережі мобільного зв'язку 5G, а також категорій загроз, що виникають на кожному з рівнів;
- оцінка ефективності компонент системи захисту відповідно до кожної з категорій загроз.

2. Sahu G., Pawar S. S. Smart Healthcare in Smart City using Wireless Body Area Network and 5G. *Networking Technologies in Smart Healthcare*. 2022. P. 1–21. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781003239888-1>.
3. Liu S., Yan Z. Efficient Privacy Protection Protocols for 5G-enabled positioning in industrial IOT. *IEEE Internet of Things Journal*. 2022. Vol. 9, No 19. P. 18527–18538. DOI: <https://doi.org/10.1109/jiot.2022.3161148>.
4. Mustakim H. 5G vehicular network for smart vehicles in Smart City: A Review. *Journal of Computer, Electronic, and Telecommunication*. 2020. Vol. 1, No 1. DOI: <https://doi.org/10.52435/complete.v1i1.44>.
5. Siriwardhana Y., Porambage P., Ylianttila M., Liyanage M. Performance analysis of local 5G operator architectures for industrial internet. *IEEE Internet of Things Journal*. 2020. Vol. 7, No 12. P. 11559–11575. DOI: <https://doi.org/10.1109/jiot.2020.3024875>.
6. Overview of 5G security challenges and solutions / Ahmad I. et al. *IEEE Communications Standards Magazine*. 2018. Vol. 2, No 1. P. 36–43. DOI: <https://doi.org/10.1109/mcomstd.2018.170006>.
7. Agiwal M., Saxena N., Roy A. Ten commandments of emerging 5G networks. *Wireless Personal Communications*. 2017. Vol. 98, No 3. P. 2591–2621. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11277-017-4991-8>.
8. Mahmoodi T. 5G and software-defined networking (SDN). 5G Radio Technology Seminar. *Exploring Technical Challenges in the Emerging 5G Ecosystem*. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1049/ic.2015.0034>.
9. Kaloxylos A., Spapis P., Moscholios I. SDN-based session and Mobility Management in 5G Networks. *Wiley 5G Ref*. 2020. P. 1–17. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119471509.w5gref223>.
10. Algarni A., Thayananthan V. Improvement of 5G Transportation Services with SDN-based Security Solutions and beyond 5G. *Electronics*. 2021. Vol. 10, No 20. P. 2490. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics10202490>.
11. Feil P. Workshop on federated testbeds for NFV/SDN/5G: Experiences and feedbacks (FedTest). *2017 IEEE Conference on Network Function Virtualization and Software Defined Networks (NFV-SDN)*, 06-08 November 2017. Berlin : IEEE, 2017. P. 1-1. DOI: <https://doi.org/10.1109/nfv-sdn.2017.8169821>.
12. Barakabitze A. QoE management of multimedia services using machine learning in SDN/NFV 5G networks. *Multimedia Streaming in SDN/NFV and 5G Networks*. 2022. P. 73-97. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119800828.ch5>.
13. Cardenas A., Fernandez D. Network Slice Lifecycle Management Model for NFV-based 5G Virtual Mobile Network Operators. *2020 IEEE Conference on Network Function Virtualization and Software Defined Networks (NFV-SDN)*, 10-12 November 2020. Leganes : IEEE, 2020. P. 120-125. DOI: <https://doi.org/10.1109/nfv-sdn50289.2020.9289883>.
14. Le L.-V., Lin B.-S. P., Tung L.-P., Sinh D. SDN/NFV, Machine Learning, and Big Data Driven Network slicing for 5G. *2018 IEEE 5G World Forum (5GWF)*, 09-11 July 2018. CA, Silicon Valley : IEEE, 2018. P. 20-25. DOI: <https://doi.org/10.1109/5gwf.2018.8516953>.
15. Bausch J. Recurrent quantum neural networks. *Curran Associates: Advances in Neural Information Processing Systems*. 2020. Vol. 33. P. 1368-1379.
16. Benedetti M., Lloyd E., Sack S., Fiorentini M. Parameterized quantum circuits as machine learning models. *Quantum Science and Technology*. 2019. Vol. 4, No 4. P. 043001. DOI: <https://doi.org/10.1088/2058-9565/ab4eb5>.
17. Orus R., Mugel S., Lizaso E. Quantum computing for finance: Overview and prospects. *Reviews in Physics*. 2019. Vol. 4. P. 100028.
18. The power of Quantum Neural Networks / Abbas A. et al. *Nature Computational Science*. 2021. Vol. 1, No 6. P. 403–409. DOI: <https://doi.org/10.1038/s43588-021-00084-1>.
19. Adnan M. H., Ahmad Zukarnain Z., Harun N. Z. Quantum key distribution for 5G networks: A review, State of Art and Future Directions. *Future Internet*. 2022. Vol. 14, No 3. P. 73. DOI: <https://doi.org/10.3390/fi14030073>.
20. Agiwal M., Roy A., Saxena N. Next generation 5G wireless networks: A comprehensive survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2016. Vol. 18, No 3. P. 1617–1655. DOI: <https://doi.org/10.1109/comst.2016.2532458>.

Tsiapa S.M. A COMPREHENSIVE METHOD OF PROTECTING THE INFRASTRUCTURE OF THE 5G MOBILE COMMUNICATION NETWORK

An analysis of potential threats of unauthorized access, unauthorized changes to stream data sets, blocking of software platform functions and control of the information channel, which must be taken into account when building a strategy for protecting the infrastructure of the 5G mobile communication network, has been carried out. It is noted that the complexity of the task is related to the multi-level structure of the network, which includes the need to identify threats at the level of the user's mobile device, radio interface, edge network, communication transport network, main domain and external information nodes. A comprehensive method of protecting the relevant infrastructure levels is proposed, which includes the organization of a software-configured network, the application of algorithms based on the virtualization of network functions, and the implementation of quantum channels for the distribution of encryption keys. As a result of the study,

the effectiveness of protecting the infrastructure against (i) bots, MitM Attack, DOS/DDoS attacks, changes in the code of software applications, interference with the operation of the hardware and software platform, the introduction of malicious software and the false start of the security system on levels of the user's mobile device; (ii) radio jamming, man-in-the-middle attacks and traffic interception at the radio interface level; (iii) threats to the architecture of edge computing with multiple access, inclusion of additional information nodes by attackers, side channel attacks, and problems with access control and authentication at the edge network level; (iv) DOS/DDoS attacks, interference with the user data set, threats to the architecture of edge computing with multiple access at the level of the communication transport network; (v) threats related to the application of the application software interface and network division, virtualization of hardware resources, DOS/DDoS attack, unauthorized access at the level of the main domain; (vi) vulnerabilities of external hardware resources and software applications of cloud services, bots, threats related to the application of the application software interface and inclusion in the general network of roaming partners at the level of external information nodes.

Key words: *5G mobile communication networks, protection strategy, quantum key distribution, cloud services, edge computing, virtualization of network functions, software-configured network.*

ІНФОРМАТИКА, ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ

УДК 004.891.3

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.2.1/20>

Болобан О.А.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Петренко А.І.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ АЛГОРИТМУ EMD ДЛЯ ОЦІНКИ РІВНЯ КИСНЮ В КРОВІ

У цій статті пропонується дослідити сигнал пульсоксиметрії та застосувати метод розпізнавання, заснований на емпіричному розкладанні цього сигналу.

Виявлення рівня насичення крові киснем (десатурації) за сигналами пульсоксиметрії має велике значення для діагностики апное уві сні. Підрахувавши десатурацію, можна отримати індекс, який допоможе діагностувати важкі випадки синдрому обструктивного апное-гіпноное уві сні. Важливо мати автоматичні методи виявлення, що дозволяють проводити скринінг цього синдрому, зменшуючи потребу в дорогих дослідженнях на основі полісомнографії.

Десатурація створює дуже специфічну хвильову картину, яка виділяється в режимах розкладання. Використовуючи цю інформацію, будується детектор на основі правильно вибраних меж і набору простих правил.

Індекс десатурації кисню, побудований на основі цих виявлень, визначає синдром обструктивного апное-гіпноное сну з високою чутливістю (0,838) і дає кращі результати, ніж стандартні підходи до виявлення десатурації.

Результати дослідження показали, що алгоритм EMD може бути ефективним інструментом для оцінки рівня кисню в крові, оскільки параметри емпіричних мод корелюють з цим показником. Це може мати важливі наслідки для діагностики та лікування пацієнтів з різними захворюваннями, пов'язаними з кровообігом та достатністю кисню в організмі.

Метод EMD може бути корисним в контексті біомедичних досліджень та медичної практики. Рекомендовані далі дослідження, які будуть спрямовані на більш глибоке дослідження можливостей використання EMD для оцінки рівня кисню в крові, зокрема, у зв'язку з певними хворобами та патологічними станами.

Відзначимо, що EMD може бути корисним в контексті біомедичних досліджень та медичної практики. Його застосування може бути особливо корисним для моніторингу пацієнтів з різними захворюваннями, такими як серцеві недостатності, бронхіальна астма та інші захворювання легень.

Узагальнюючи, стаття висвітлює важливість застосування алгоритму EMD для оцінки рівня кисню в крові та вказує на його можливу роль в біомедичних дослідженнях та медичній практиці.

Ключові слова: дистанційний моніторинг, синдром обструктивного апное-гіпноное уві сні, десатурація, полісомнографія, серцевий ритм, натільні пристрої, метод емпіричної декомпозиції моди (ЕДМ).

Постановка проблеми. Порушення сну включають понад 80 патологій у дорослих і дітей [1]. Такі розлади викликають денну сонливість, що вражає від 35 до 40% дорослого населення США, і є важливою причиною захворюваності та смертності. Більш поширеною та важливою патологією сну є синдром обструктивного апное-

гіпноное уві сні (OSAHS). Цей розлад характеризується повторюваним зменшенням потоку повітря, спричиненим періодичною частковою або повною обструкцією верхніх дихальних шляхів під час сну. Основними наслідками цього розладу є фрагментація сну, зниження насичення крові киснем і надмірна денна сонливість [2, 3, 4, 5].

За даними останніх досліджень [6, 7], поширеність синдрому у населення без урахування симптомів сонливості, за оцінками, становить 24% і, якщо це пов'язано з симптомами, зменшується приблизно до 3–7% у чоловіків і 2–5% у жінок. Варто зазначити, що оцінка значно вища, у пацієнтів із серцевими або метаболічними порушеннями, ніж у загальній вибірці.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасним золотим стандартом діагностики OSAHS є полісомнографія (PSG). PSG – це нічне дослідження, яке проводиться в центрі сну в тихій і темній кімнаті, яке складається з одночасного запису електроенцефалографії (ЕЕГ), електроокулографії (ЕОГ), електроміографії (ЕМГ), електрокардіографії (ЕКГ), насичення киснем (SpO₂), ороназального потоку повітря, рухів грудної клітки та живота, положення тіла та інших сигналів. PSG дозволяє оцінити індекс апное/гіпопное (АHI), який використовується як основний показник тяжкості OSAHS. PSG контролюється техніком, і його аналіз вимагає стомлюючої оцінки, часто вручну [8]. Це дослідження вимагає великих витрат, його доступність обмежена, і за ніч можна проводити лише одне дослідження.

Та для більш зручного запису даних є можливість використання окремих PPG сигналів, які дають змогу отримати та записати такі дані:

- SpO₂ – рівень кисню в крові;
- BPM – серцевий ритм;
- IR – рівень пропускання інфрачервоного світла;
- R – рівень пропускання червоного світла;
- G – рівень пропускання зеленого світла.

Для натільних пристроїв прилад PPG більш зручний та надає достатньо інформації для подальшої обробки. Оскільки PPG пристрій має бути постійно на користувачеві, він має бути компактним та непомітним у повсякденному користуванні. Тому ми маємо проблему використання батареї та визначення розміру даних, яких буде достатньо для подальшої обробки.

Емпірична декомпозиція моди (EMD) – це повний метод аналізу сигналів, керований даними, який можна застосувати до нестационарних і нелінійних сигналів, запропонований Huang та ін. [9]. EMD розкладає сигнал на зазвичай невелику кількість компонентів, відомих як функції внутрішнього режиму (IMF) або режими. EMD успішно використовувався для виділення дихального сигналу з ЕКГ [10], а також для виявлення апное, обробивши сигнал назального потоку повітря [3] і навіть ЕКГ [11]. Як небажаний ефект ми можемо

згадати проблему, відому як «змішування режимів», коли дуже схожі коливання присутні в різних режимах. Це частково можна уникнути за допомогою версій EMD із шумовою підтримкою, наприклад Ensemble EMD [12] з дуже хорошими результатами в обробці голосу [13], але з високою обчислювальною вартістю та залишковим шумом у реконструйованому сигналі.

У цій роботі ми визначаємо оптимальний розмір даних, щоб надалі його обробити за допомогою алгоритму на основі EMD для виявлення десатурації, пов'язаної з апное/гіпопное сну, у сигналах пульсоксиметрії. Метою цієї процедури є оцінка індексу, який веде себе подібно до класичного індексу апное/гіпопное, отриманого з PSG, але використовуючи лише інформацію про десатурацію кисню, виміряну за допомогою пульсоксиметрії. Це буде зроблено шляхом розкладання сигналу оксиметрії за допомогою EMD, визначення конкретних режимів, де інформація, пов'язана з десатурацією, виглядає більш чітко, і використання набору належним чином вибраних порогів і простих правил для підрахунку кожної десатурації.

Постановка завдання.

Сигнал оксиметрії

Оксиметрія – це вимірювання процентного насичення гемоглобіну киснем. Насичення артеріальної крові киснем зазвичай позначають SpO₂. Пульсоксиметрія – це неінвазивна оцінка периферичного насичення киснем (SpO₂), заснована на пропусканні, поглинанні та розсіюванні світла під час його проходження крізь гемоглобін. Дані отримують за допомогою датчика світла, що містить два джерела світла (червоне та інфрачервоне), які поглинаються гемоглобіном і передаються через тканини на фотодетектор. Вимірювання SpO₂ є менш точним при низьких значеннях, і 70% насичення зазвичай береться як найнижче точне значення. Типові технічні характеристики пульсоксиметрів включають частоту дискретизації 1Гц, роздільну здатність 1% і точність $\pm 2\%$ у діапазоні від 70% до 100%.

SpO₂ та OSAHS

Для діагностики OSAHS необхідний повний PSG. За допомогою цих записів лікар-спеціаліст може точно діагностувати цей синдром, враховуючи кількість повних і часткових перешкод (апное і гіпопное відповідно) дихання за годину сну. Ця величина відома як індекс апное-гіпопное (АHI) [14]. Це дуже дороге дослідження, а лабораторій сну мало, особливо в країнах, що розвиваються.

Нічну черезшкірну пульсоксиметрію все частіше використовують для раннього скринінгу

OSAHS через її низьку вартість і простоту. Під час обструктивного апное десатурація кисню є звичайним явищем, але вона може бути відсутньою під час гіпноное або у випадках підвищеного опору верхніх дихальних шляхів [14]. У першому випадку десатурація демонструє типову пілкоподібну форму хвилі зі швидким збільшенням SpO₂ під час або після збудження. Однак це збільшення не таке різке при гіпноное, а пілкоподібний малюнок може бути повністю відсутнім при центральному апное.

Обструктивне апное/гіпноное характеризується тимчасовим зменшенням або повною зупинкою дихання. У клінічній практиці апное не розглядається як відмінність від обструктивного гіпноное, оскільки ці явища мають схожу патофізіологію. Щоб вважатися подією апное/гіпноное, необхідно виконати критерій 1 або 2, а також критерій 3 з наступного [15]:

1. Амплітуда дійсного сигналу, пов'язаного з диханням, повинна демонструвати чітке зниження ($\geq 50\%$) від базової лінії. Ця базова лінія визначається як середня амплітуда сигналу при стабільному диханні та оксигенації за 2 хвилини до початку події.

2. Чітке зменшення амплітуди валідованого показника дихання під час сну, яке не досягає попереднього критерію, але відбувається при десатурації кисню, що перевищує або дорівнює 3%, або при збудженні.

3. Тривалість події 10 с і більше.

Наш інтерес полягає в оцінці індексу з високою чутливістю для виявлення OSAHS. Однак, це непросте завдання для реальних сигналів SpO₂. Існує багато проблем, які потрібно вирішити, наприклад артефакти, шум квантування, базова лінія тощо.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Збір даних

Для збору даних про SpO₂ сигнали було використано сенсор Max30102, який складається з трьох світлодіодів: червоного, інфрачервоного та зеленого та датчика освітленості. На рис. 1 показано принцип роботи сенсора.

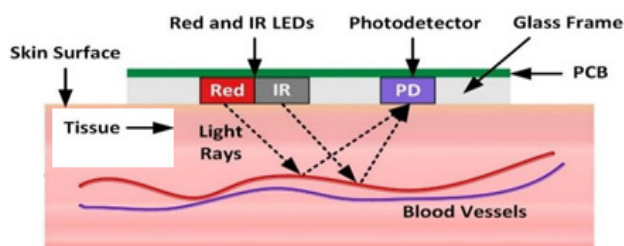


Рис. 1. Принцип дії фотоплетизмографа

Дихання впливає на серцевий цикл шляхом зміни внутрішньо-плеврального тиску між грудною стінкою та легеньми. Оскільки серце знаходиться в грудній порожнині між легеньми, парціальний тиск вдиху і видиху сильно впливає на тиск на порожнисту вену і наповнення правого передсердя.

Під час вдиху внутрішньо-плевральний тиск знижується до 4 мм рт. ст., що розтягує праве передсердя, сприяючи швидкому наповненню з порожнистої вени, збільшуючи переднавантаження шлуночків, але зменшуючи ударний об'єм. І навпаки, під час видиху серце стискається, знижуючи ефективність серцевої діяльності та збільшуючи об'єм одного удару. Коли частота і глибина дихання збільшуються, венозне повернення збільшується, що призводить до збільшення серцевого ритму [16].

Джерело світла та електричне коло

Світло, що проходить або відбивається тканиною, несе сигнал PPG. У видимій області домінуючий пік поглинання знаходиться в синій області спектра, за якою йде зелено-жовта область (500–600 нм), що відповідає еритроцитам (рис. 2). Світло коротших хвиль сильно поглинається меланіном. Вода поглинає світло в ультрафіолетовому та довгому інфрачервоному (ІЧ) областях. Червоне (R, 660 нм) та ІЧ (940 нм) світло проходить через тканини та кров. Таким чином, ІЧ-випромінювання використовується в датчиках PPG. За останнє десятиліття ефективність світлодіодів зросла, а їхня пряма напруга знизилася, що призвело до збільшення кількості люменів на ват. Через високу потужність освітлення різниця серцевого циклу між систолічною та діастолічною фазами демонструє великі варіації довжини хвилі зеленого кольору.

Також показано довжини хвиль зеленого, червоного та ближнього ІЧ-діапазону поглинання зеленого світла світлодіодів оксигемоглобіном (O₂Hb) і дезокси-гемоглобіном (RHb) набагато більше, ніж ІЧ-світло.

Таким чином, зміна кількості відбитого зеленого світла, спричинена кровотоком, є більшою, ніж у відбитому ІЧ-світлі, що призводить до кращого SNR [17, 18, 19].

Обробка даних

Сигнал пульсоксиметрії пальця доповнюється інформацією про стан оксиметра. Коли пацієнт змінює своє положення або просто рухає кінцівками, цей рух може спричинити артефакти та зробити вимірювання не вірними. Це спричиняє розрив сигналу з різким стрибком до значення насичення 0,1%. Таким чином, отриманий сигнал може мати одну

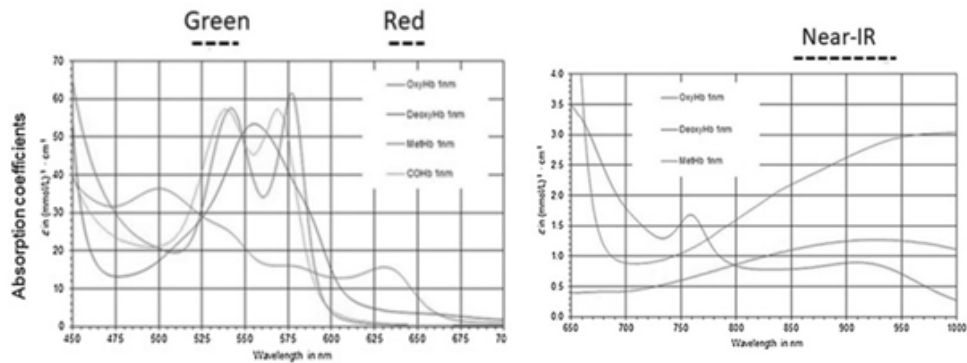


Рис. 2. Поглинання світла дезокси-гемоглобіном (RHb), оксигемоглобіном (O₂Hb), карбоксигемоглобіном (COHb) і метгемоглобіном (MetHb) на різних довжинах хвиль

або кілька недійсних частин під час дослідження. Ці неінформативні компоненти погано впливають на алгоритм EMD [20], тому їх слід уникати.

Для цього ми використовуємо дані про стан датчика та просто усуваємо проміжок часу, протягом якого сигнал датчика є недійсним, об'єднуючи попередні та наступні дані. Хоча це може здатися неприродним, ми спробували інші альтернативи, наприклад інтерполяцію з використанням різних методів, і в усіх випадках інтерполяція також створює проблеми в алгоритмі EMD, що робить результати непридатними для використання. З цієї причини ми застосували цей простий метод.

Додаткова проблема пов'язана з квантуванням: кожен рівень квантування відповідає 1% значення насиченості. Цей шум квантування створює артефакти в результуючому розкладанні EMD. Щоб зменшити його вплив і врахувати, що десатурація, викликана апное, матиме періоди більше 5 с, що відповідає коливанням 0,2Гц, ми застосовуємо КІХ-фільтр низьких частот із частотою зрізу 0,25Гц для попередньої обробки сигналу.

EMD алгоритм для рівня SpO₂

SpO₂ має знизитися щонайменше на 3% і тривати 10 с або довше, щоб вважатися подією апное/гіпопное. Це зниження вимірюється від базової лінії, що відповідає нормальній оксигенації. На жаль, немає єдиної думки щодо методології оцінки цього базового рівня [21]. Один підхід заснований на використанні середнього значення SpO₂ для всього дослідження. Інший метод враховує лише перші 3 хвилини [22]. Тим не менш, у деяких випадках SpO₂ може знизитися до стабільного значення, яке нижче вихідного рівня під час сну.

Щоб уникнути цих проблем, використовуються динамічні оцінки базової лінії. Чинер та ін. [23] використовують середнє значення SpO₂ протягом попередніх n хвилин як базову оцінку. Цю ж стратегію

використовують де Шазаль та ін. [24]. Інший метод застосовано Vázquez та ін. [25, 26]. У цих випадках базовий рівень оцінюється за допомогою верхнього п'ятого процентиля значень SpO₂ за п'ять хвилин, що передували події. Цей метод не враховує значення SpO₂ під час десатурації, і з цієї причини базова оцінка набагато більше схожа на базальне значення під час нормального дихання. Еквівалентна процедура використовується в нещодавньому дослідженні [27], де вони приймають за базову лінію середнє значення 20% верхніх даних SpO₂ протягом 1 хв. Основні помилки алгоритмів виявлення десатурації пов'язані з неправильними оцінками базової лінії.

Результат дослідження

В ході експериментальних досліджень було досліджено оптимальний час запису даних та час сну для мікроконтролера (мк). В ході дослідження було визначено, що IR значення записується кожні 250 мс. Для запису одного циклу потрібно отримати 16 значень, а отже 4 с на один цикл.

Оскільки одне значення IR має формат int, який використовує 4 байти, максимальний розмір передачі даних в TCP пакеті складає 1024 байти, бо містить 256 значень формату int.

На основі цих параметрів визначено кількість циклів, яка має корисну інформацію, щоб уникнути повторень. Таким чином, за 1 хвилину відбувається запис майже 6 циклів.

Для повного циклу використовується сигнал 1.512 мАг з тривалістю 2 хв, і даного циклу вистачає, аби отримати достатню кількість інформації, тому після циклу можна перевести мк в режим сну на 10 хв, при цьому в режимі сну мк споживає 0.02мА.

Оскільки є ймовірність виникнення шумів, запис показників протягом 2 хв дає змогу відфільтрувати ці шуми без втрати інформації. Саме за такої конфігурації ми отримуємо найбільш точні показники

(рис. 3), можливість фільтрувати та видаляти дані, що не мають користі, та економити заряд батареї.

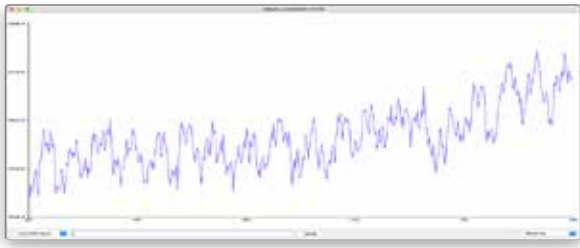


Рис. 3. Показники IR світла на пальці з циклом запису протягом 2 хвилини

Висновки.

Було запропоновано варіанти збору даних про рівень кисню в крові для подальшої обробки їх за допомогою EMD алгоритму. В результаті досліджень було виявлено, що оптимальний час на запис одного циклу – це 2 хвилини, та протягом наступних 10 хвилин мікроконтролер може перейти в режим сну, що дасть змогу економити заряд батареї. В подальшій роботі планується розробити алгоритм перетворення BPM (серцевого ритму) в показник SpO₂, щоб мікроконтролер не витрачав потужність для обчислення цих даних, а також розробити алгоритм фільтрації даних безпосередньо на мікроконтролері.

Список літератури:

1. American Academy of Sleep Medicine, The international classification of sleep disorders, revised. Diagnostic and Coding Manual, 2nd Edition (2001).
2. Hornero R, Alvarez D, Ab asolo D, del Campo F, Zamarrón C, Utility of Approximate Entropy From Overnight Pulse Oximetry Data in the Diagnosis of the Obstructive Sleep Apnea Syndrome, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* 54 (1) (2007) 107–113.
3. Salisbury JI, Sun Y, Rapid screening test for sleep apnea using a nonlinear and nonstationary signal processing technique, *Medical Engineering and Physics* 29 (2007) 336–343.
4. Unal M, Öztürk L, Kanik A., The role of oxygen saturation measurement and body mass index in distinguishing between non-apneic snorers and patients with obstructive sleep apnoea syndrome, *Clinical Otolaryngology* 27 (2002) 344–346.
5. Strollo PJ, Rogers RM, Obstructive sleep apnea, *The New England Journal of Medicine* 334 (2) (1996) 99–104.
6. De Backer W, Obstructive sleep apnea/hypopnea syndrome, *Panminerva medica* 55 (2) (2013) 191–195.
7. Lurie A, Obstructive sleep apnea in adults: epidemiology, clinical presentation, and treatment options, *Advances in cardiology* 46 (2011) 1–41.
8. Thurnheer R, Bloch KE, Laube I, Gugger M, Heitz M, Respiratory polygraphy in sleep apnoea diagnosis, *Swiss Medical Weekly* 137 (2007) 91–102.
9. Huang NE, Shen Z, Long SR, Wu MC, Shih HH, Zheng Q, Yen NC, Tung CC, Liu HH, The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis, *Proc. R. Soc. Lond. A* 454 (1998) 903–995.
10. Balocchi R, Menicucci D, Santarcangelo E, Sebastiani L, Gemignani A, Ghelarducci B, Varanini M, Deriving the respiratory sinus arrhythmia from the heartbeat time series using empirical mode decomposition, *Chaos, Solitons and Fractals* 20 (2004) 171–177.
11. Mendez M, Corthout J, Van Huffel S, Matteucci M, Penzel T, Cerutti S, Bianchi A, Automatic screening of obstructive sleep apnea from the ecg based on empirical mode decomposition and wavelet analysis, *Physiological measurement* 31 (3) (2010) 273.
12. Wu Z, Huang NE, Ensemble empirical mode decomposition: a noise-assisted data analysis method, *Advances in Adaptive Data Analysis. Theory and Applications* 1 (2009) 1–41.
13. Schlotthauer G, Torres ME, Rufiner HL, A new algorithm for instantaneous F0 speech extraction based on ensemble empirical mode decomposition, in: *Proc 17th European Sig Proc Conf EUSIPCO 09, Glasgow, Scotland, 2009*, pp. 2347–2351.
14. Schlosshan D, Elliott MW, Sleep 3: Clinical presentation and diagnosis of the obstructive sleep apnoea hypopnoea syndrome, *Thorax* 59 (4) (2004) 347–352.
15. McNicholas WT, Diagnosis of obstructive sleep apnea in adults, *Proc Am Thorac Soc* 5 (2) (2008) 154–160.
16. Liao H-E. Two discrete oscillator based adaptive notch filters (OSC ANFs) for noisy sinusoids. *IEEE Trans Signal Process.* 2005;53:528–538.
17. Sami HM, Kleinman BS, Vassyl A, Lonchyna NA. Central venous pulsations associated with a falsely low oxygen saturation measured by pulse oximetry. *J Clin Monit.* 1991;7(4):309–312.
18. Shelley KH, Tamai D, Jablonka D, Gesquiere M, Stout RG, Silverman DG. The effect of venous pulsation on the forehead pulse oximeter wave form as a possible source of error in SpO₂ calculation. *Anesth Analg.* 2005;100:743–747.

19. Cui W, Ostrander LE, Lee BY. In vivo reflectance of blood and tissue as a function of light wavelength. *IEEE Trans Biomed Eng.* 1990;37(6):632–639.
20. Kim D, Kim K, Oh H.-S, Extending the scope of empirical mode decomposition by smoothing, *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing* 2012 (1) (2012) 168.
21. Berry R, Budhiraja R, Gottlieb D, Gozal D, Iber C, Kapur V, Marcus C, Mehra R, Parthasarathy S, Quan S, et al., Rules for scoring respiratory events in sleep: update of the 2007 AASM manual for the scoring of sleep and associated events. deliberations of the sleep apnea definitions task force of the american academy of sleep medicine., *Journal of clinical sleep medicine: JCSM: official publication of the American Academy of Sleep Medicine* 8 (5) (2012) 597–619.
22. Zamarr on C, Romero PV, Rodriguez JR, Guda F, Oximetry spectral analysis in the diagnosis of obstructive sleep apnoea, *Clinical Science* 97 (4)(1999) 467–473.
23. Chiner E, Signes-Costa J, Arriero JM, Marco J, Fuentes I, Sergado A, Nocturnal oximetry for the diagnosis of the sleep apnoea hypopnoea syndrome: a method to reduce the number of polysomnographic, *Thorax* 54 (1999) 968–971.
24. de Chazal P, Heneghan C, McNicholas WT, Multimodal detection of sleep apnoea using electrocardiogram and oximetry signals, *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 367 (1887) (2009) 369–389, PMID: 18974035.
25. V´azquez JC, Tsai WH, Flemons WW, Masuda A, Brant R, Hajduk E, Whitelaw WA, Remmers JE, Automated analysis of digital oximetry in the diagnosis of obstructive sleep apnoea, *Thorax* 55 (4) (2000) 302–307.
26. Burgos A, Góni A, Illarramendi A, Bermudez J, Real-time detection of apneas on a PDA, *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine* 14 (4) (2010) 995–1002.
27. Xie B, Minn H, Real-time sleep apnea detection by classifier combination, *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine* 16 (3) (2012) 469–477.

Boloban O.A., Petrenko A.I. PECULIARITIES OF USING THE EMD ALGORITHM TO ESTIMATE THE LEVEL OF OXYGEN IN THE BLOOD

This paper proposes to investigate the pulse oximetry signal and apply a recognition method based on the empirical decomposition of this signal.

Detecting the level of blood oxygen saturation (desaturation) based on pulse oximetry signals is of great importance for the diagnosis of sleep apnea. By calculating desaturation, you can get an index that will help diagnose severe cases of obstructive sleep apnea-hypopnea syndrome. It is important to have automatic detection methods that allow screening for this syndrome, reducing the need for expensive studies based on polysomnography.

Desaturation creates a very specific wave pattern that stands out in the decay modes. Using this information, a detector is built based on correctly selected limits and a set of simple rules.

The oxygen desaturation index, built on the basis of these findings, identifies OSA with high sensitivity (0.838) and gives better results than standard approaches to detect desaturation.

The results of the study showed that the EMD algorithm could be an effective tool for assessing blood oxygen levels, as the parameters of the empirical modes correlate with this measure. This could have important implications for the diagnosis and treatment of patients with various circulatory disorders and oxygen deficiency.

The EMD method can be useful in the context of biomedical research and medical practice. Recommend further research aimed at a deeper exploration of the possibilities of using EMD for assessing blood oxygen levels, particularly in relation to certain diseases and pathological conditions.

It should be noted that EMD can be useful in the context of biomedical research and medical practice. Its application can be particularly useful for monitoring patients with various conditions such as heart failure, bronchial asthma, and other lung diseases.

In summary, the article highlights the importance of using the EMD algorithm for assessing blood oxygen levels and points to its possible role in biomedical research and medical practice.

Keywords: *remote monitoring, obstructive sleep apnea-hypopnea syndrome, desaturation, polysomnography, heart rhythm, body devices, empirical mode decomposition (EDM) method.*

Бочок В.О.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Федорова Н.В.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

БАГАТОАГЕНТНІ СИСТЕМ ТА ПРОБЛЕМИ ЇХ ОПТИМІЗАЦІЇ

У статті розглянуто багатоагентні системи, як явище. Досліджуються сфери їх використання, особливості та відмінні риси. Стаття аналізує та узгоджує декілька джерел для формування єдиного розуміння специфіки багатоагентних систем. Надається узагальнене визначення агенту, як основної складової та діяча багатоагентних систем, та пояснюються їх відмінні властивості (автономність, індивідуальність та обмеженість сприйняття, децентралізованість). Наведено пояснення інтелектуальності агента, та класифікація за даною ознакою. Для визначення агенту наводиться популярна наразі модель Переконавання-Бажання-Намір, що використовується у таких фреймворках, як JADE.

Жоден агент не здатний повною мірою задовольнити потреби всієї системи в повному обсязі, а отже вимушений взаємодіяти з іншими учасниками. В статті наведено механізм інформаційної взаємодії, класифікацію її видів та інфраструктурну складову.

Згідно з перерахованими особливостями, механізмів комунікації та координації дій, виділяється проблема оптимальності роботи багатоагентних систем. В результаті аналізу та узгодження інформації з різних джерел, було сформовано проблеми оптимізації притаманні багатоагентним системам. Стаття наводить декілька фундаментальних проблем оптимізації, та аналізує їх особливості в багатоагентному середовищі. Наводиться різниця між алгоритмами, що вимагають наявності центра координації, та можливості децентралізованої реалізації.

Для агентів, що здатні до навчання, проблема оптимізації поставлена окремо, адже вирішується окремими підходами. Такі системи навчаються оптимізуватися самостійно на власному досвіді, проте вимагають багато обчислювальних ресурсів та часу. Для розв'язання цієї проблеми аналізуються підходи обміну досвідом між агентами, та наводиться перспективність подальших досліджень.

Ключові слова: багатоагентні системи, модель переконання-бажання-намір, мова запитів та маніпулювання знаннями, навчання з підкріпленням, оптимізація багатоагентних систем.

Постановка проблеми. За допомогою багатоагентних систем знаходять вирішення все більше завдань в різних сферах науки та техніці. Такі системи досить стабільні та відмовостійкі. За допомогою них можна відійти від традиційних способів математичного моделювання та інженерних практик, що розглядають характеристики складної системи в цілому, як централізовану та неподільну. Багатоагентні системи дозволяють працювати з системою як з набором індивідуальних, розумних компонентів, що взаємодіють. Так можна розв'язувати задачі, що являють собою складну, незрозумілу чи непрозору логіку, рівняння тощо. Також, за своєю природою, кожен агент є незалежним від інших і може бути оброблений в паралельному режимі.

Багатоагентні системи за своєю архітектурою нагадують деякі системи в реальному житті, такі як фінансові ринки, транспортні системи, соці-

альні структури тощо. Це багато в чому мотивує їх використання для вирішення подібних завдань.

Багатоагентні системи здатні до самоорганізації, проте оптимальність їх роботи залишається під питанням. Варто зазначити, що багатоагентні системи розвивались у різних напрямках (як спосіб моделювання і дослідження, як інтелектуальні програмні системи, як фізичні системи тощо), де кожен привносить свої визначення та характеристики. Наразі існує проблема з їх узагальненням та розділенням. Алгоритми оптимізації можуть відрізнятися залежно від обраної архітектури. Для прикладу, залежно від здатності до навчання чи наявності певних центрів, методи оптимізації можуть вимагати спеціальних виділених сутностей, або бути спрямованими на підбор (автоматичний чи ручний) параметрів агентів, або ж на алгоритми координації дій.

Формулювання цілей статті. Стаття ставить за мету дослідити багатоагентні системи та їх особ-

ливості. Відповідно до цього, розглянути проблеми оптимізації таких систем, а також проаналізувати існуючі підходи до вирішення певних завдань.

Окремо у статті ставиться задача визначення потенційних шляхів оптимізації, що враховують специфіку системи та які не було розглянуто раніше, чи мали певні недоліки.

Визначення багатоагентної системи. Багатоагентна система або ще її називають мультиагентна система (MAS – Multi-Agent System) – це система, що утворена більше ніж одним інтелектуальним агентом та середовищем, в якому вони діють, поширюють знання та комунікують. Такі системи є здатні до самоорганізації та тісно пов'язані з завданнями побудови штучного інтелекту.

Варто розрізнити агентне моделювання (ABM – Agent-Based Model) та багатоагентні системи.

Агентне моделювання здебільшого використовується в науці для досліджень взаємодії автономних, індивідуальних чи колективних агентів, та впливу її на систему в цілому. Агент в такому випадку не зобов'язаний бути інтелектуальним [1]. Багатоагентні системи ж, орієнтовані на вирішення конкретних інженерних завдань, що лежать за межами цілей кожного окремого агента [2].

Визначення агента, його характеристик та видів. Визначення агента різняться в літературі, залежно від автора, сфери використання та завдання. Узагальнено, агентом може бути реальна чи віртуальна, автономна, інтелектуальна сутність, що має власні цілі. Вона здатна вирішувати завдання самостійно чи за допомогою взаємодії з іншими агентами. Агенти здатні сприймати інформацію від середовища (наприклад, через сенсори) чи інших агентів та взаємодіяти з ними (за допомогою актуаторів).

Можна виділити такі властивості, що притаманні агентам:

- 1) автономність – здатність діяти без прямого втручання ззовні, хоча б часткова незалежність від інших агентів та здатність контролювати свої дії;
- 2) індивідуальність світосприйняття – кожен агент будує власну модель того, як він бачить світ;
- 3) обмеженість сприйняття – жоден агент не має глобального бачення ситуації або вона занадто складна та не може бути їм використана;
- 4) децентралізованість – жоден агент не контролює всю систему (інакше вона перетвориться в монолітну систему).

Класифікація агентів за «інтелектуальністю» різняться в літературі, далі буде наведено один з варіантів [3]:

1) рефлекторні (реакційні) – діють на основі поточного стану світу, реагують на зміни в середовищі. Стратегії та умови дій таких агентів заздалегідь визначено розробниками в формі “якщо-то”;

2) рефлекторні, що засновано на моделі – такі агенти зберігають деякий внутрішній стан, що залежить від попередньої історії сприйняття, мають певне розуміння (модель) того, як працює світ;

3) засновані на цілях агенти (рис. 1) – відстежують стан світу та обирають дії, що в результаті призведуть до досягнення цілей (перехід в бажаний стан, або один з таких). Досягнення цільового стану може вимагати більше одного кроку, в таких випадках може застосовуватися планування дій;

4) засновані на корисності агенти (рис. 2) – такі агенти максимізують своїми діями значення своєї функції корисності. Такі агенти можуть більш раціонально оцінювати ситуацію, ніж засновані на цілях, обирати більш пріоритетні дії, краще орієнтуватися в багатокрокових стратегіях.

5) здатні до навчання – такі агенти здатні навчатися на власному досвіді, оцінювати свої дії, підлаштовуватись під середовище, для покращення продуктивності. Вони можуть підлаштуватися навіть під нові умови, які не були враховані під час їх проектування. Таких агентів іноді називають когнітивними.

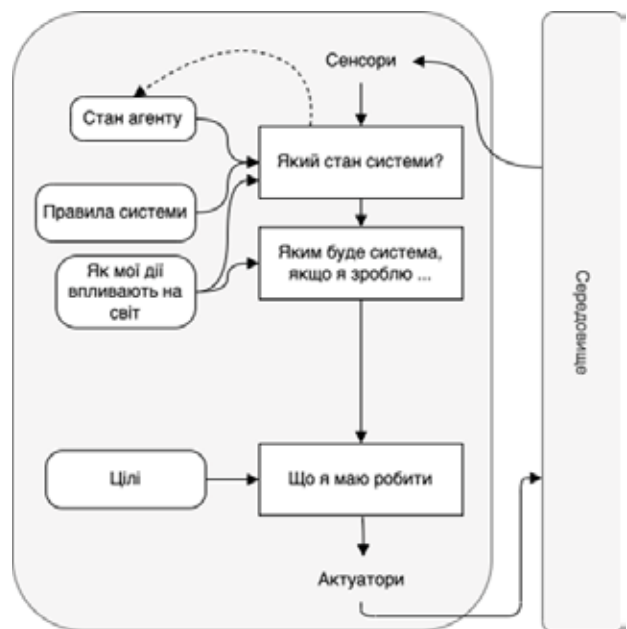


Рис. 1. Діаграма, що заснована на цілі агента

Модель Переконавання-Бажання-Намір (BDI – Belief-Desire-Intention), є популярною технікою проектування агентів. Така модель використовується в популярному фреймворку побудови багатоагентних систем JADE, що написано на Java.

1) переконання (belief) – досвід і знання про навколишнє середовище, правила виводу нових знань з наявних.

2) бажання (desire) – ціль (стан), який агент бажає досягти. Бажань може бути декілька, вони можуть міняти один одного, залежно від ситуації.

3) намір (intention) – намір вчинити дію, що згідно з переконаннями призведе до досягнення цілей.

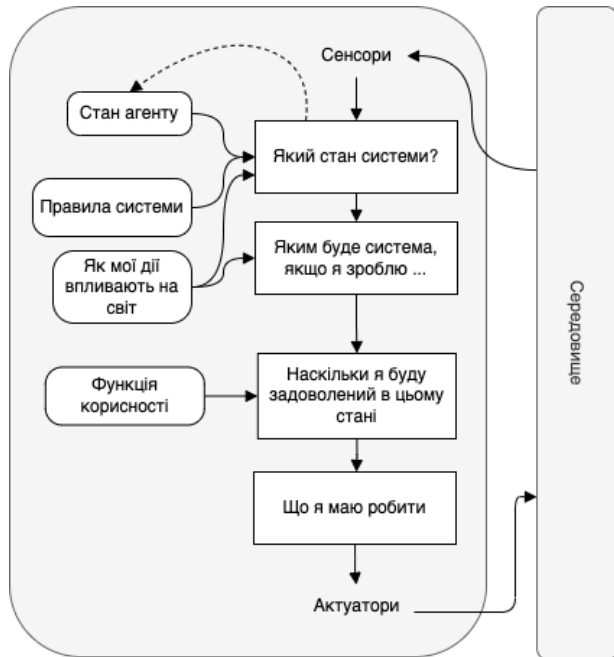


Рис. 2. Діаграма заснованого на користі агента

Чим більш інтелектуальний агент, тим менше розробнику треба продумувати та реалізовувати логіку його дій. Агенти також можуть бути пасивними чи активними. Пасивні лише реагують на зміни в середовищі, а активні діють за власною ініціативою.

Важливо зазначити, що агент також характеризується здатністю чи нездатністю виконувати певні дії [5]. Вона може характеризуватися двома компонентами, такими як фізична можливість (наявність певних інтерфейсів, актуаторів, фізичне розташування, стан тощо) та знання як це зробити (англ. “know-how”) [5]. Так, агент може мати необхідний актуатор, проте не знати алгоритм його використання для отримання цільового результату. Протилежна ситуація також можлива. В правильно побудованій BDI моделі, в агента наявні лише такі наміри, що повністю доступні йому для виконання. Слід також враховувати, що агент може задовольняти свої потреби за допомогою взаємодії з іншими, запросивши їх послуги.

Для інтелектуальних моделей, що засновані на моделях машинного навчання, переконання

та бажання можуть кодуватися в єдиній сутності. Так, наприклад, приховані шари (hidden layers) нейронмережі кодують досвід, переконання, правила виводу нових знань та їх обробки. Тут так само можуть бути закодовано й бажання – знання про пріоритетний стан в конкретній ситуації. Для моделей, що засновані на Reinforcement learning, тобто «навчанні з підкріпленням», бажання можуть бути закодовано в функцію, що обраховує успішність дій агента. Така функція вирішує, нагородити агента за дію (reward) чи покарати (penalty).

Комунікація та взаємодія агентів в багато-агентній системі. Комунікація відіграє критичну роль в побудові багатоагентних систем. За її допомогою відбувається кооперація та координація дій. У [6] виділяється 2 види інформаційної взаємодії агентів:

1) локальна форма – пряма взаємодія між агентами, двостороння передача повідомлень. Зберігання повідомлень не передбачено (якщо тільки агент-учасник немає подібного функціоналу). Забезпечується максимальна відмовостійкість;

2) мережева форма – архітектура «дошки оголошень». Використовує посередника, що зберігає повідомлення в спільній пам'яті, забезпечує ефективний пошук. Така архітектура дозволяє повідомляти агентам про зміни в репозиторії, контролювати типи даних та цільові групи видавців-отримувачів. В літературі також зустрічаються підтипи такої взаємодії:

а) дошки запитів – тут публікуються запити на виконання певної роботи. Агенти-виконавці обирають запит для подальшої роботи.

б) дошка послуг – тут публікуються сервіси, що агенти можуть і хочуть надати. Агенти-клієнти обирають кращого виконавця.

в) брокер – тут збираються запити й сервіси, між ними встановлюється найкраща відповідність.

Роль посередника в мережевій формі комунікації може відігравати як інфраструктура середовища, так і окремий вид агента (також відомого як middle-agent). За цю роботу він може брати плату. Такі агенти потрібні не тільки для оптимального розподілу завдань та ресурсів, але і як центри комунікації та координації.

В багатоагентних системах немає вимог, що агент має бути постійно доступним, а їх кількість постійною. Агенти можуть від'єднуватись та приєднуватись до системи. Це викликає проблеми комунікації та моніторингу доступних ресурсів в системі. Такі агенти можуть виступати локаль-

ними центрами, проте тоді їх відключення здатне завдати великої шкоди системі. Децентралізована пряма комунікація більш стійка до відмов, проте може бути складнішою при меншій ефективності.

Для комунікації різних агентів необхідно використовувати певну уніфіковану мову, що надасть певний спільний мовний формат та спільну онтологію. Мовний формат (протокол) однозначно інтерпретується усіма учасниками, в той час, як онтологія забезпечує єдине розуміння одного й того самого повідомлення всіма [6]. Популярною мовою комунікації в багатоагентних системах є Мова запитів та маніпулювання знаннями (KQML – Knowledge Query and Manipulation Language).

KQML задумано як формат повідомлень і протокол їх обробки, щоб сприяти безперервній взаємодії між агентами. KQML складається з трьох рівнів:

1) рівень комунікації, що вказує інформацію про агента-відправника та агента призначення, мітку або ідентифікатор запиту;

2) рівень повідомлень, який визначає функцію, що виконується;

3) рівень змісту, що забезпечує необхідні деталі до виконання конкретного запиту.

У KQML рівень комунікації є низькорівневим на основі пакетів. Комунікаційні потоки KQML можуть бути побудовані на основі TCP/IP, UDP або на основі будь-якого іншого протоколу передачі пакетів. Також треба згадати про платформу FIPA – Foundation for Intelligent Physical Agents, що надає стандарти побудови агентних систем, а також надає власний протокол комунікації між агентами. Вищезгаданий фреймворк JADE є сумісним з FIPA.

Кожен агент за потреби виконує ролі «менеджер» – замовник та «підрядник» – виконавець. Якщо в процесі рішення агент-менеджер не в змозі вирішити деяке завдання, він шукає інший відповідний агент, здатний її вирішити. Для цього часто необхідно розбиття складного завдання на менші підзадачі та знаходження агентів-підрядників, які можуть ефективно виконати ці завдання. Підрядник може стати агентом-менеджером і розподілити підзавдання між агентами-виконавцями для того, щоб скоротити власні витрати часу на її вирішення. Менеджер укладає договір (контракт) з агентом-підрядником через процес торгів (конкурсу). У процесі здійснення конкурсу агент-менеджер задає тип необхідного ресурсу та опис задачі. Агенти, які знаходяться в режимі очікування та мають ресурси, необхідні для виконання

завдання, подають пропозиції із зазначенням їх можливостей. Якщо на оголошення вирішуваного завдання відповідають кілька агентів, то агент-менеджер, користуючись деяким критерієм, оцінює отримані заявки, вибирає найбільш відповідного підрядника та присуджує контракт [6].

Процес торгів може залежати від видів агентів, що беруть участь. Існують агенти індивідуальні, що мають власні цілі, а також групові, що мають спільну ціну. індивідуальні (егоїстичні) перш за все дбають про власну вигоду, а групові здатні поступатися власними доходами, чи витратити більше, заради перемоги команди. Егоїстичні агенти також можуть надавати неправдиву чи вибірккову інформацію аби отримати певні переваги.

Можливість виникнення помилок слід враховувати при конструюванні багатоагентних систем. Можна виділити такі категорії:

1) навмисні (навмисно вчиняються учасником комунікації)

- a) створення вигаданих фактів;
- b) викривлення існуючих фактів;
- c) вибіркковість фактів;

2) випадкові

a) помилки сприйняття (через обмеженість сприйняття, технічні помилки тощо);

b) помилки обробки;

c) помилки передачі (здебільшого вирішуються протоколами комунікації).

В [5] вказано на те, що під час мовленнєвих актів під час торгів варто також влаштовувати можливість агента-виконавця досягти бажаного результату і його намір. Мовленнєвий акт може вважатися успішним, якщо цільовий стан системи було досягнуто, проте не в результаті діяльності агента-виконавця. Якщо це має значення, то критерій успіху також має враховувати фактичну можливість агента-виконавця задовольнити умови (фізичну можливість та know-how).

В [7] показано, що насичення агентів внутрішніми потребами в груповій приналежності, визначеності та компетентності призводить до появи соціальної поведінки серед агентів. Така поведінка виражається в альтруїзмі стосовно агентів у групі та ворожих тенденціях до агентів поза групою. Подібним чином фактори навколишнього середовища та ситуації сприяли появі викидів: агенти з ворожих груп стають близькими друзями. Необхідно підкреслити, що такі ефекти не були спеціально запрограмовані, а є результатом незалежних рішень агентів. Явища кооперації та координації спостерігаються на тлі обмежених ресурсів чи можливостей агентів.

Важливим є розуміння концепту середовища, що в різних авторів може мати різне значення. Середовищем можна вважати все, що не є агентом. Це й інфраструктура комунікацій (мережа, цифрові «феромони» тощо), ресурси тощо.

В [8] можна знайти більш детальну інформацію, разом з описом еволюції поняття, різних його трактувань.

Проблема оптимізації системи. Багатоагентні системи відносяться до тих, що здатні до самоорганізації. Цілі агентів ніколи не покривають глобальної цілі, задля якої була створена система. Загальна ефективність системи залежить не тільки від оптимальних дій кожного агента, але й від їх взаємодії. Можливо навести аналогію з командною грою в футбол. Де гравці (агенти) мають свої ролі, для яких вони мають найкращі властивості. Кожен агент має свої цілі, як спільну командну (перемогти), так і особисту (виступити найкращим чином, задля потенційного отримання кращих контрактів). При неправильному узгодженні цілей, агент може ризикнути задля особистих цілей, наразивши на небезпеку перемоги команди. Також, при поганій координації дій, для переваги й індивідуальні навички гравців можуть використовуватися не в повну силу.

Проблемою також є обмеженість сприйняття світу, що заважає приймати оптимальні рішення. Агент може знати все про середовище, проте не знати про внутрішній стан інших, їх потенціальні дії. Якщо ж агент може сприймати всю систему, то не здатний все обробити чи впливати на всі аспекти. Інакше така система перетворюється на монолітну, де кожен агент і є системою, можливо в декількох екземплярах.

Огляд існуючих підходів до оптимізації. Система, подібно до ройових чи градієнтних алгоритмів, може поступово, ітеративно шукати оптимальні рішення або застрягнути в локальних екстремумах. Це зумовлює необхідність планувати та впроваджувати механізми оптимізації на різних рівнях.

В [9] автори розглядають методи оптимізації декількох фундаментальних проблем багатоагентних систем:

- 1) як збирати колективи (формування коаліції);
- 2) як приймати спільні рішення для координації дії (розподілена оптимізація обмежень);
- 3) як розподілити обмежені ресурси та завдання (багатоагентний розподіл ресурсів).

В [9] наводяться алгоритми та підходи для оптимізації класів задач, їх переваги та недоліки, враховуючи те що багатоагентні системи не цен-

тралізовані, а відповідно, такі алгоритми мають бути закладені в кожний агент. Альтернативою може бути спеціалізований агент (наприклад middle agent брокер), що візьме на себе обов'язок оптимально виконувати певні задачі (зазвичай, координувати), а інші будуть звертатися за його послугами.

Деякі алгоритми вимагають наявності спеціального агента чи інфраструктури в середовищі. Для прикладу, аукціони, як спосіб «чесного» розподілу ресурсів, вимагає щось, що буде приймати та обробляти ставки, не приймаючи в них участі. В деяких реалізаціях вимагається секретність значень ставок до моменту їх обробки для прийняття неупереджених рішень. Для формацій колективів кожен агент може для себе оцінювати користь від вступу в групу, подавати заявки на вступ, а група вже буде голосувати за прийняття чи відмову, залежно від користі для групи, на конкурсній основі. Можливий також сценарій координації групоутворення з локального центру, коли важливим є не конкурентна боротьба між групами, а набір завдань, що мають бути вирішені певними силами. Прикладом такого є боротьба з надзвичайними ситуаціями. Центр (диспетчер) має мінімізувати шкоду, а для розв'язання проблем комбінувати обмежену кількість ресурсів (наприклад, пожежних груп, карет швидкої та екіпажів поліції). Під координацією дій в [6] мається на увазі обмеження доступних варіантів дій агента. Це може бути як декларативна так і імперативна команда. Проте агент все ще проявляє власний контроль та сам обирає як йому діяти згідно з власними переконаннями та можливостями. В деяких системах агент може вступити в переговори для зміни умов або взагалі відмовитись від виконання. Тому всі ці проблеми й способи їх оптимізації вимагають цілеспрямованого їх розв'язання розробниками.

В інтелектуальних же агентах, що здатні до навчання, механізми оптимізації реалізуються за допомогою обробки власного досвіду. Такий підхід демонструє високу ефективність, адже здатний враховувати взаємозв'язки неочевидні чи недосліджені. Чим більше досвіду тим оптимальніші дії. Наразі популярними є агенти побудовані за допомогою Reinforcement Learning. Існує велика кількість робіт, що досліджують використання різних моделей, способів нагороджень та покарань, функцій оцінки ефективності. Також можна зустріти підходи з розбиття комплексних стратегій на менші, використання узагальнених, наперед навчених на різних завданнях та даних моделей. Варто лише зазначити, що такі моделі

вимагають багато обчислювальних ресурсів, а також часу. А іноді й спеціалізованих великих наборів даних.

Проте, більшість авторів фокусуються саме на індивідуальному навчанні агентів, не розглядаючи можливість обміну досвідом/знаннями між агентами. Так, наприклад, люди вчаться не тільки на власному досвіді, але й від інших людей. В [10] висвітлюється і досліджується проблема обміну знаннями між однорідними агентами в багатоагентному навчанні з підкріпленням. Результатом роботи стало підвищення ефективності моделей, до того ж з використанням меншої кількості ресурсів, що зумовило актуальність робіт цього спрямування.

Висновки. В статті розглянуто багатоагентні системи та її компоненти. Були наведені характерні особливості її складових та різні методи їх взаємодії. Відповідно до перерахованих осо-

бливостей системи (децентралізованість, обмеженість світосприйняття, локальна модель світу) була поставлена проблема неоптимальності роботи таких систем. В роботі проаналізовано типові проблеми оптимізації в багатоагентних системах та особливості їх застосування. В ході аналізу підкреслено нестачу досліджень, що розглядають обмін знаннями та умовиводами між агентами, особливо, здатними до навчання. Також бракує досліджень, що розглядають обмін знаннями в системах з нульовою чи низькою довірою. Гарним прикладом системи з нульовою довірою є мережа біткоїна. Деякі підходи можуть бути адаптовані звідти.

Потенційно, подальші дослідження щодо обміну знаннями, умовиводами та моделями світу між агентами здатне підвищити точність роботи таких систем, зі зменшенням ресурсів, необхідних для навчання агентів.

Список літератури:

1. Kubera Y., Mathieu P., Picault S.. Everything can be Agent!. 9th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS 2010), May 2010, Toronto, Canada. p.1547-1548.
2. Tweedale J., Ichalkaranje N., Sioutis C., Jarvis B. Innovations in multi-agent systems, Journal of Network and Computer Applications, Volume 30, Issue 3, 2007, p. 1089-1115
3. Russell S., Norvig P. Artificial Intelligence: A Modern Approach. – Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall, 2010. – p1132.
4. Rao A., Georgeff M. BDI Agents: From Theory to Practice. Proc. of the 1st Int. Conference on MultiagentSystems. – 1995. – p. 312–319.
5. Singh M. Towards a formal theory of communication for multiagent systems. In Proceedings of the 12th international joint conference on Artificial intelligence - Volume 1 (IJCAI'91). Morgan Kaufmann Publishers Inc., San Francisco, CA, USA, p. 69–74.
6. Парасюк І. Ершов С. Методи взаємодіяння і координації в мультиагентних системах на основі нечіткої логіки вищого типу. Проблеми програмування. 2014. № 2-3. С. 242-252.
7. G. Volkmer, N. Alsabah. Group Cohesion in Multi-Agent Scenarios as an Emergent Behavior. 2022. (arXiv preprint arXiv:2211.02089).
8. Weyns D., Omicini A., Odell J. Environment as a first class abstraction in multiagent systems. Auton Agent Multi-Agent Syst 14, p. 5–30 (2007).
9. Cerquides J., Farinelli A., Meseguer P., Sarvapali D. A Tutorial on Optimization for Multi-Agent Systems. The Computer Journal. Volume 57, Issue 6, 2014, p. 799–824
10. Gao Z., Xu K., Ding B., Wang H., Li Y., Jia H. KnowSR: Knowledge Sharing among Homogeneous Agents in Multi-agent Reinforcement Learning. 2021. (arXiv preprint arXiv:2105.11611).

Bochok V.O., Fedorova N.V. MULTI-AGENT SYSTEMS AND PROBLEMS OF THEIR OPTIMIZATION

The article deals with multi-agent systems as a phenomenon. The article explores the areas of their use, features and distinctive characteristics. The article analyzes and harmonizes several sources to form a common understanding of the specifics of multi-agent systems. A generalized definition of an agent as the main component and actor of multiagent systems is given, and their distinctive properties (autonomy, individuality and limited perception, decentralization) are explained. An explanation of the agent's intelligence and its classification by this feature is given. To define an agent, the currently popular Belief-Desire-Intent model used in such frameworks as JADE is presented.

No single agent is able to fully satisfy the needs of the entire system, and therefore has to interact with other participants. The article describes the mechanism of information interaction, the classification of its types and the infrastructure component.

According to these features, communication and coordination mechanisms, the problem of optimal operation of multi-agent systems is highlighted. As a result of the analysis and coordination of information from various sources, optimization problems inherent in multi-agent systems were formed. The article presents several fundamental optimization problems and analyzes their peculiarities in a multi-agent environment. A distinction is made between algorithms that require a coordination center and those that can be implemented in a decentralized manner.

For agents capable of learning, the optimization problem is posed separately, because it is solved by separate approaches. Such systems learn to optimize independently from their own experience, but require a lot of computing resources and time. To solve this problem, we analyze the approaches to sharing experience between agents and provide prospects for further research.

Key words: *multi-agent systems, belief-desire-intention model, query language and knowledge manipulation, reinforcement learning, optimization of multi-agent systems.*

Галаган Р.М.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Андрєєв С.М.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Петрик В.Ф.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Баженов В.Г.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Лисенко Ю.Ю.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ВИЯВЛЕННЯ ДЕФЕКТІВ БЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ЗОБРАЖЕНЬ ЗА ДОПОМОГОЮ ЗГОРТКОВИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ

Своєчасне виявлення зовнішніх дефектів бетонних конструкцій (зокрема, бетонних стін, бетонних опор мостів) є актуальною задачею, оскільки внаслідок їх неконтрольованого розвитку може відбутися руйнування. Сьогодні основним підходом до оцінки зовнішнього стану бетонних конструкцій є візуальний огляд або аналіз фотографій людиною, що привносить суб'єктивний фактор та не дозволяє автоматизувати аналіз та процес прийняття рішень. Одним із способів автоматизації процесу виявлення дефектів та їх аналізу є застосування нейромережових технологій.

У роботі описано структуру програмного забезпечення, за допомогою якого відбувається автоматизоване виявлення дефектів на зображеннях бетонних конструкцій. Воно складається із трьох модулів: модуля попередньої обробки зображення, модуля класифікації та модуля автоматичного аналізу і візуалізації. Завдяки модульності програмне забезпечення легко підтримується, розширюється та дозволяє впроваджувати нові функціональні можливості.

Запропоновано використовувати згорткову нейронну мережу VGG16, яка дозволяє досягти більшої точності на меншій кількості даних у порівнянні із подібними реалізаціями. Показано, що найбільш оптимальним для вирішення поставлених задач є використання мережі VGG16 у режимі Transfer Learning. Створена модель нейронної мережі налаштована таким чином, щоб виконувати бінарну класифікацію (дефектна та бездефектна зона). Проте вона має потенціал до розширення та можливість виконувати класифікацію за різними типами дефектів. Розроблене програмне забезпечення було застосоване до набору зображень бетонних елементів мостових конструкцій CODEBRIM, до якого були додані ще й власні зображення, зроблені на цифрову фотокамеру при денному освітленні. Після навчання мережа дозволила виявляти дефекти типу тріщин та сколів із вірогідністю безпомилкового визначення (precision) 96,3%.

Ключові слова: бетонна конструкція, дефект бетону, аналіз зображень, нейронна мережа, VGG16.

Постановка проблеми. Будівельні конструкції бувають найрізноманітніших форм та видів, однак для усіх них неминучим є фізичне та моральне старіння конструктивних елементів та матеріалів. Руйнівні процеси, що протікають у конструкціях,

призводять до утворення пошкоджень – тріщин, прогинів, деформацій, окислення, корозії металевих деталей тощо. Вони можуть бути зовнішніми чи прихованими. Одними із складових будівельних конструкцій, до яких завжди можна отримати

доступ і які можуть надати значну інформацію про стан об'єкту в цілому, є зовнішні елементи, наприклад, стіни будинків, опорні бетонні конструкції мостів тощо. Зокрема, за поверхневими тріщинами у стінах можна судити про ступінь зношення та міцність матеріалу в цілому. Тріщини з'являються не лише від недостатньої здатності стін підтримувати навантаження, а й через поганий стан інших конструкцій: основ, фундаментів тощо.

Для оцінки зовнішнього стану елементів будівельних конструкцій зазвичай застосовують або візуальний огляд конструкції, або аналіз знімків, що зроблені цифровими фотокамерами. За наявності невеликого об'єму інформації оператор може самостійно впоратися із завданням аналізу цифрових знімків, хоча тут може бути присутній суб'єктивний фактор. Проте за наявності значного об'єму візуальної інформації ефективність роботи оператора різко знизиться, при цьому підвищиться ризик прийняття помилкового рішення.

Ефективним рішенням автоматизації процесу аналізу цифрових знімків для виявлення дефектів бетонних конструкцій є застосування нейромережових технологій спільно із системою комп'ютерного зору. Дефектом може бути: тріщина, корозія конструкційної сталі, осип будівельного матеріалу з подальшим оголенням арматури та інших несучих елементів, напливи матеріалу, дефектні шви тощо. Система аналізу зображень бетонних конструкцій може мати широке застосування в галузі виробництва будівельних матеріалів та будівництва для автоматизованого контролю якості продукції та споруд. Система може бути розміщена на об'єктах інфраструктури (наприклад, мостах) для прогнозування та контролю за термінами служби споруд за зовнішніми ознаками.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Застосування нейронних мереж (НМ) для аналізу зображень сьогодні вже є чимось звичним. Існують різноманітні бази даних із зображенням, які використовуються для тренування та перевірки працездатності тієї чи іншої мережі. Проте в контексті вирішуваної задачі потрібні не просто набори зображень, а зображення саме бетонних конструкцій (точніше, їх частин) із дефектами. Аналіз останніх досліджень показує, що існує проблема із наборами даних, які містять зображення саме бетонних конструкцій з дефектами і без них. Наприклад, у роботі [1] для навчання та тестування НМ використовувався набір із 3500 зображень бетонних поверхонь, причому основною метою було дослідження впливу

певних параметрів моделі НМ на точність класифікації. У роботі [2] порівнюються різні моделі НМ та підходи до класифікації дефектів бетонних конструкцій, а для навчання та тестування моделі використовуються 487 зображень, із яких за певним алгоритмом виділені 3186 графічних зон, із яких 527 містять дефекти, а 2659 – ні. У роботі [3] також пропонується використовувати НМ для класифікації дефектів різних будівельних конструкцій, причому для навчання мережі використовувались знайдені за допомогою звичайного пошуку в інтернеті зображення, серед яких було 278 зображень зі сколами та 954 – із тріщинами. У роботі [4] авторами пропонується використання архітектур НМ з метанавчанням (для тестування НМ було створено набір із 1500 зображень).

Як видно із наведених прикладів, усі набори даних в розглянутих роботах є досить малими. Тому в кожній роботі було застосовано підхід, який полягає у «нарізуванні» великих зображень на менші частини з метою збільшення вибірки даних. Такий самий підхід буде використано і у цій роботі.

Постановка завдання. Метою дослідження є розробка окремих модулів програмного забезпечення (ПЗ) для системи комп'ютерного зору, яка дозволить із заданою вірогідністю виявляти дефекти бетонних конструкцій. В основі ПЗ має бути НМ. Головним критерієм якості моделі пропонується використати метрику *precision*, яка визначає долю правильно класифікованих дефектів на зображеннях, які насправді є дефектами (фактично, показує ймовірність правильних передбачень системи):

$$P = \frac{TP}{TP + FP},$$

де *TP* – істинно-позитивні передбачення моделі, *FP* – хибно-позитивні передбачення моделі.

На першому етапі розробки поставлена задача лише автоматизованого виявлення зовнішніх неоднорідностей бетонних стін без їх мультикласової класифікації. Це означає, що на даному етапі неможливо буде сказати, яким саме дефектом є неоднорідність.

Вихідні дані та обладнання. Основним джерелом вихідних даних, що використовувалися для навчання та тестування НМ, є набір фотографій COConcrete DEfect BRidge IImage Dataset [5]. Цей набір містить більше 1500 фотографій високої роздільної здатності (максимально 6000x4000 пікселів) і призначений для навчання та тестування різних нейромереж для пошуку зовнішніх дефектів у бетонних елементах мостових конструкцій.

Також до цього набору була додана деяка кількість власних зображень бетонних стін.

Важливо зауважити, що самі вихідні фотографії неможливо використовувати для навчання та тренування НМ, оскільки, по-перше, їх замало, а, по-друге, вони містять багато зайвої інформації, яка може негативно вплинути на процес навчання мережі. Тому спочатку була виконана попередня обробка даних, яка полягає у «нарізуванні» вихідних фотографій на окремі частини заданих розмірів (мінімально 256x256 пікселів). У результаті попередньої обробки було отримано кілька десятків тисяч фрагментів, із яких вручну були відібрані близько 4000 інформативних фрагментів, а усі інші фрагменти, що не містили жодної корисної інформації, були відсіяні. Інформативні фрагменти були порівну розділені на два класи: дефектний і бездефектний. Підготовка даних у ручному режимі для навчання й тестування НМ була зроблена лише у межах виконання цієї роботи. У режимі роботи на реальних об'єктах «нарізування» вихідних зображень має відбуватись автоматично.

Для розробки моделі НМ була використана бібліотека Keras мови програмування Python. Технічні характеристики обладнання, на якому виконувалась розробка та тестування НМ, представлені у табл. 1.

Опис архітектури програмного забезпечення. Розроблене програмне забезпечення складається з трьох модулів: модуль завантаження та попередньої обробки зображення (МЗПОЗ), модуль комп'ютерного зору – класифікатор (МКЗК) та модуль автоматичного аналізу і візуалізації (МАОВ).

Модуль МКЗК складається із згорткової НМ з архітектурою VGG16, у результаті роботи якої отримують активаційні шари та передбачення (prediction), що передається в модуль візуалізації МАОВ.

Модуль МАОВ є керівним модулем, який приймає вихідне зображення та проводить його «пірамідальну» обробку та нарізку. Після цього модуль МАОВ почергово передає нарізані зображення у модулі МЗПОЗ і МКЗК, звідки приймає передбачення і активаційні шари, за допомогою

яких проводиться візуалізація. Проаналізувавши всі частини зображення, модуль МАОВ складає загальну активаційну карту і позначає області зображення з позитивним (дефектним) передбаченням.

Реалізація модуля МЗПОЗ. Завантажувальний модуль містить функцію читання цифрового зображення, що повертає тривимірний масив колірної схеми RGB, значення кожного елементу якого лежать у діапазоні від 0 до 255:

$$IMG_{m,n} = \begin{pmatrix} RGB_{1,1} & RGB_{1,2} & \dots & RGB_{1,n} \\ RGB_{2,1} & RGB_{2,2} & \dots & RGB_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ RGB_{m,1} & RGB_{m,2} & \dots & RGB_{m,n} \end{pmatrix},$$

де $IMG_{m,n}$ – цифрове зображення, $RGB_{ij} = (RED\ GREEN\ BLUE)$.

Після завантаження зображення відбувається його нормалізація, яка передбачає перетворення кольорового зображення у градації сірого. Таке перетворення виконується з метою покращення «узгодженості» (або «однорідності») даних.

Також модуль МЗПОЗ виконує ще одну важливу функцію. Хоча, як було показано у попередньому розділі, кількість відібраних інформативних фрагментів склала близько 4000, проте цих даних все ж замало для перевірки працездатності розробленої НМ, оскільки частина зображень використовується для навчання, частина – для тренування і валідації. Тому, враховуючи, що детермінант дефектного класу (дефект на зображенні) не має певної стандартної орієнтації на зображенні і не визначається своїми розмірами, було прийнято рішення у модулі МЗПОЗ використовувати аугментацію зображень. Ця техніка використовується для штучного збільшення розміру навчального набору даних шляхом створення модифікованих версій зображень цього набору даних. Навчання моделей НМ на більшій кількості даних може призвести до створення більш точних моделей, а техніка доповнення дозволяє створювати варіації зображень, які можуть поліпшити здатність моделей узагальнювати отримані знання на нові зображення. Модуль МЗПОЗ виконує аугментацію за правилами, що описані у табл. 2.

Таблиця 1

Технічні характеристики обладнання

Складові обладнання	Опис
CPU	i7-8750H 6 Cores, 12 Threads, 2.20 GHz, 9 MB Cache, 8 GT/s
GPU	GTX 1050 TI 4GB VRAM
RAM	32 GB DDR4-2666
SDD	1000 GB

Таблиця 2

Правила аугментації

Діапазон повороту (у градусах)	[-15, 15]
Діапазон масштабування	width = 0.1, height = 0.1
Діапазон яскравості	[0.5, 1.25]
Обертання	vertical = True, horizontal = True

Реалізація модуля МКЗК. Потужною архітектурою НМ, що призначена для обробки зображень, є згорткова НМ CNN [6], яка містить у собі вхідний, навчальний і вихідний шари. Вхідний шар зчитує зображення і переносить його на навчальні шари, які виконують операції згортки та фільтрацію для видобутку особливостей зображення. Вихідний шар класифікує зображення відповідно до цільових категорій, використовуючи особливості, отримані у навчальних шарах. НМ може бути навчена, призначаючи цільові категорії зображенням у набір навчальних даних та ітеративно змінюючи значення фільтрів за допомогою зворотного розповсюдження до тих пір, поки не буде досягнуто бажаної точності.

У роботі було прийнято рішення використовувати поширену архітектуру згорткової нейронної мережі VGG16 [7]. У подібних дослідженнях, що були проведені раніше департаментами цивільної та природної розробки університетів штату Юта і Кларксона, використовувалась модель AlexNet [8]. За результатами досліджень було зроблено висновок, що у цьому випадку варто застосовувати сучасніші та «важкі» моделі НМ. Модель VGG16 досконаліша за AlexNet та дозволяє досягти більшої точності на меншій кількості даних.

Архітектура використовуваної моделі VGG16 у вигляді списку шарів наведена у табл. 3. Фактично, це стандартна модель VGG16, проте у ній було модифіковано вхідний та класифікаційні шари з метою зменшення кількості параметрів. Це зроблено із двох причин. По-перше, у класичній імплементації моделі VGG16 у вихідних шарах використовується зв'язка з шару max_pooling з наступними двома парами шарів почергово dense та dropout розмірністю 4096 вузлів кожен. Однак у такому випадку ми отримуємо 134 мільйони параметрів, що потребує великих обчислювальних потужностей та унікальних даних. Використовуване нами обладнання не змогло б за адекватний час впоратись із поставленим завданням. По-друге, завдяки зменшенню кількості параметрів була знижена ймовірність перетренування моделі, оскільки вихідні дані не мають достатньої внутрішньокласової диференціації.

Таблиця 3

Перелік шарів використовуваної моделі НМ

Layer (type)	Output Shape	Param #
input_1 (InputLayer)	None, 256, 256, 3	
block1_conv1 (Conv2D)	None, 256, 256, 64	1792
block1_conv2 (Conv2D)	None, 256, 256, 64	36928
block1_pool (MaxPooling2D)	None, 256, 256, 64	
block2_conv1 (Conv2D)	None, 128, 128, 128	73856
block2_conv2 (Conv2D)	None, 128, 128, 128	147584
block2_pool (MaxPooling2D)	None, 64, 64, 128	
block3_conv1 (Conv2D)	None, 64, 64, 256	295168
block3_conv2 (Conv2D)	None, 64, 64, 256	590080
block3_conv3 (Conv2D)	None, 64, 64, 256	590080
block3_pool (MaxPooling2D)	None, 32, 32, 256	
block4_conv1 (Conv2D)	None, 32, 32, 512	1180160
block4_conv2 (Conv2D)	None, 32, 32, 512	2359808
block4_conv3 (Conv2D)	None, 32, 32, 512	2359808
block4_pool (MaxPooling2D)	None, 16, 16, 512	
block5_conv1 (Conv2D)	None, 16, 16, 512	2359808
block5_conv2 (Conv2D)	None, 16, 16, 512	2359808
block5_conv3 (Conv2D)	None, 16, 16, 512	2359808
block5_pool (MaxPooling2D)	None, 8, 8, 512	
global_average_pooling2d	None, 512	
flatten (Flatten)	None, 512	
dense (Dense)	None, 256	131328
dense_1 (Dense)	None, 1	257
Total params: 14,846,273		
Trainable params: 131,585		
Non-trainable params: 14,714,688		

Кожен шар моделі VGG16, що представлені у табл. 3, виконує певні задачі. Шари, які включають у своїй назві «conv», є стандартними згортковими шарами мережі. По своїй суті вони є набором матриць, які називаються картами ознак, кожна з яких має свій фільтр-ядро. Далі, алгоритмічно програма проходить цим ядром (яке у свою чергу є все тією ж матрицею) по картах, при цьому результат множення сегмента карти на ядро записується у результуючу матрицю. Схематично це представлено на рис. 1.

Шари MaxPooling використовуються для ущільнення попередньої матриці ознак. Вони отримують із попереднього шару квадратні матриці розміром 2x2, в яких знаходять найбільший елемент і повертають його як елемент нової матриці. Наприклад, отримавши результат, що представлений на рис. 1, шар MaxPooling поверне число 3. Ця операція дозволяє зменшити розмірність, щоб модель не перенавчалася на більше не потрібних деталях зображення.

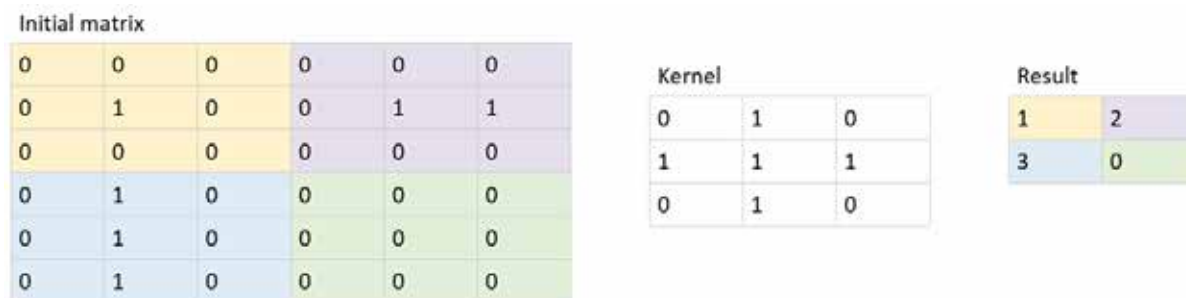


Рис. 1. Алгоритм згортки, що виконується внутрішніми шарами НМ (хоча тут показано, що ядро ухасться із кроком 3 клітинки, проте це лише спрощення для більш зрозумілої візуалізації, зазвичай воно зсувається лише на одну клітинку)

Global_average_pooling є операцією об'єднання, яка розроблена для заміни повністю пов'язаних шарів у класичних мережах CNN. Ідея полягає у створенні однієї карти ознак для кожної відповідної категорії задачі класифікації.

Шар Flatten виконує трансформацію усіх матриць у вектор-рядок, який надалі використовуватиметься шарами Dense для класифікації. Останнім шаром моделі є dense_1, який містить бінарні ваги.

Модель VGG16 має реалізації, які дозволяють використовувати її як у режимі FT (Fully Trained), так і у режимі TL (Transfer Learning). Режим FT передбачає тренування моделі з нуля, а режим TL передбачає наявність готової моделі, яка пройшла тренувальний етап на великому об'ємі інформації.

Для вибору найбільш оптимального режиму було виконано тестування розробленої моделі НМ, причому у TL режимі модель VGG16 була навчена на наборі даних ImageNet, який є відкритим (open source) [9], зі зміною вхідних та вихідних (класифікаційних) шарів. У табл. 4 наведені метрики моделі VGG16 у режимах FT і TL, що була застосована до вхідного набору даних. В обох режимах модель пройшла 25 тренувальних епох із поверненням найоптимальнішого стану моделі.

Таблиця 4

Порівняння метрик моделі VGG16 у режимах FT і TL

Параметр	TL	FT
TP	1926	823
TN	1962	1269
FP	74	1177
FN	38	731
Overall	4000	4000
Accuracy	97,2%	52,3%
Precision	96,3%	41,2%
Recall	98,1%	52,9%

Аналіз даних у табл. 4 однозначно свідчить, що режим TL є точнішим за режим FT за усіма метри-

ками. Зокрема, якщо брати як основну метрику precision, то різниця становить 55,1%. Також можна звернути увагу, що у режимі TL модель має досить збалансований розподіл P/N передбачень і не має суттєвого зсуву до одного з класів, тоді як режим FT набагато гірше справляється з пошуком дефектів і має властивість точніше виявляти бездефектні ділянки.

Реалізація модуля МААВ. Модуль автоматичного аналізу та візуалізації створено з метою передачі до модуля МКЗК попередньо обробленої інформації для подальшої її класифікації та візуалізації. Для визначення відносного розташування дефекту використовується «пірамідална» передобробка вихідних зображень, яка полягає у «нарізуванні» вихідного зображення на рівні частини встановленого розміру *S*. Після чого відбувається взяття частини більшого розміру та його згортання у зображення того самого розміру *S*. Ця процедура виконується з метою аналізу частини зображення з різним масштабом.

Далі вся інформація, отримана описаним вище шляхом, надходить послідовно модуль у модулі МЗПОЗ і МКЗК. Якщо МКЗК передає позитивне передбачення (тобто, наявність дефекту), модуль МААВ запам'ятовує квадрат, який він передав до МЗПОЗ. У тому випадку, якщо МКЗК повертає позитивний результат на частину зображення з іншим масштабом і цей фрагмент перетинається з іншим позитивним фрагментом, то модуль МААВ вибирає позитивним фрагмент, який мав максимальну кількість перетинів з іншими фрагментами (рис. 2).

Модуль МААВ також реалізує метод післяопераційного спостереження Grad-CAM [10], який відображає останній активаційний шар у вигляді теплової карти та застосовується до вже навченої НМ після завершення навчання та фіксації параметрів. Основна ідея Grad-CAM полягає у тому, що для того, щоб визначити, які частини вхідного зображення були важливими для прийняття класифікаційного рішення, використовується просто-

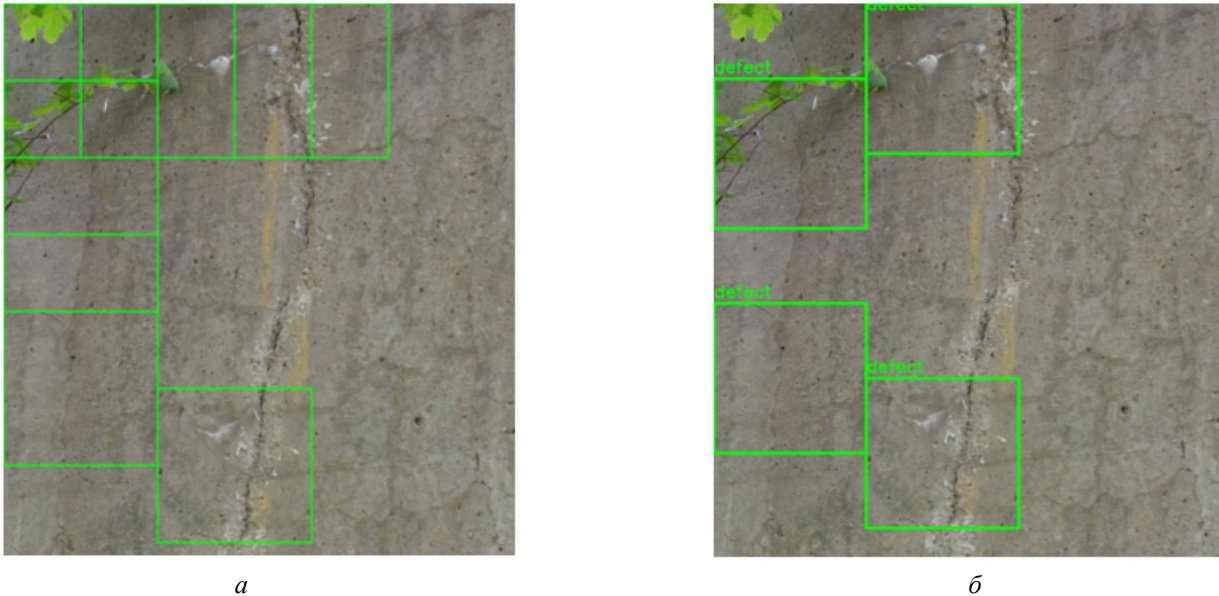


Рис. 2. Виділення елементів зображення: *a* – початкові рамки, *б* – рамки після додаткової обробки

рова інформація, яка зберігається через згорткові шари. Оскільки ця технологія використовує вже підраховані результати роботи НМ, з'являється можливість використовувати її для потокової візуалізації стану об'єкта, не виділяючи при цьому додаткових обчислювальних ресурсів. Окрім звичайної візуалізації роботи алгоритму, ця технологія дозволяє виконувати розмітку даних для задач сегментації зображень.

На рис. 3 представлена теплова карта активаційного шару згорткової мережі, що отримана на одному із вихідних зображень. Ця карта візуалізує ті ознаки, на основі яких модель НМ прийняла позитивне рішення, тобто, визначила наявність дефекту на зображенні.

Висновки. Розроблене програмне забезпечення дозволяє вирішити завдання виявлення зовнішніх дефектів бетонних конструкцій, зокрема стін. Причому його можна застосувати як для аналізу окремих зображень, так і відео. Це рішення може бути корисним для моніторингу об'єктів інфраструктури у режимі реального часу з метою проведення своєчасного ремонту.

На даний момент система не проводить класифікацію дефектів за типами, а тільки виконує бінарну класифікацію, тобто фіксує наявність певної неоднорідної області на зображенні. Внаслідок цього, наприклад, як неоднорідність може бути визначене листя дерев на фоні стіни, написи на стіні тощо. Це можна віднести до недоліків, оскільки наразі система не є гнучкою. Проте, як було показано в основній частині статті, застосування НМ до зображень із бетонними конструкціями (стінами), за умови, що вони містять тільки стіну та неоднорідності

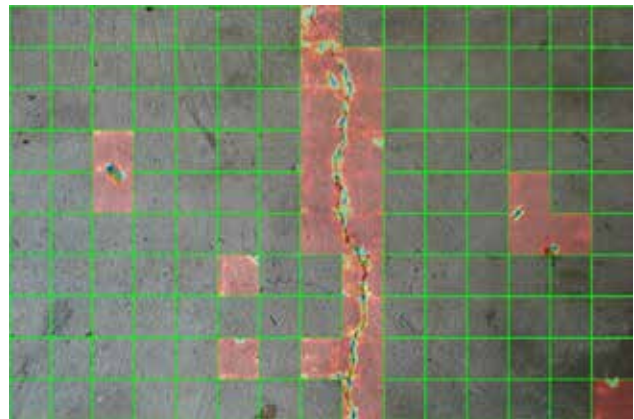


Рис. 3. Бінарна класифікація повного зображення з розбиттям на фрагменти розмірами 256x256 пікселів

у вигляді сколів і тріщини, дає дуже високу ймовірність виявлення. Для того, щоб зробити систему більш гнучкою, необхідно перейти від бінарної до мультикласової моделі згорткової мережі.

Робота має кілька напрямків для продовження. По-перше, необхідно розробити метод сегментації, який допоможе, крім виявлення дефекту, ще й відстежувати його зміни та параметри. По-друге, окрім виявлення, необхідно реалізувати можливість визначення ступеню ризику, що обумовлена тим чи іншим видом дефектів, а також придатність до подальшої експлуатації. По-третє, існуючі набори даних (dataset) замалі для адекватного тестування розробленої моделі НМ, тому для досягнення повністю робочого стану системи потрібно провести збір та обробку багаторазово більшого обсягу даних із різними варіаціями.

Список літератури:

1. Wilson R. L. da Silva and Diogo S. de Lucena. Concrete Cracks Detection Based on Deep Learning Image Classification. *International Conference on Experimental Mechanics (ICEM18)*. 2018. 2(8). 489. URL: <https://doi.org/10.3390/ICEM18-05387>
2. Kim H, Ahn E, Shin M, Sim S-H. Crack and Noncrack Classification from Concrete Surface Images Using Machine Learning. *Structural Health Monitoring*. 2019. 18(3). P. 725-738. URL: <https://doi.org/10.1177/1475921718768747>
3. Liang Yang, Bing Li, Wei Li, Zhaoming Liu, Guoyong Yang and Jizhong Xiao. Deep Concrete Inspection Using Unmanned Aerial Vehicle Towards CSSC Database. *International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. 2017. URL: <https://ericlyang.github.io/img/IROS2017/IROS2017.pdf>
4. Martin Mundt, Sagnik Majumder, Sreenivas Murali, Panagiotis Panetsos, Visvanathan Ramesh. Meta-learning Convolutional Neural Architectures for Multi-target Concrete Defect Classification with the CONcrete DEfect BRidge IMage Dataset. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2019. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1904.08486>
5. CODEBRIM: CONcrete DEfect BRidge IMage Dataset. URL: <https://doi.org/10.5281/zenodo.2620293>
6. Saad A., Tareq A. M., Saad A.-Z. Understanding of a convolutional neural network. *International Conference on Engineering and Technology (ICET)*. 2017. URL: <https://doi.org/10.1109/ICEngTechnol.2017.8308186>
7. Karen Simonyan and Andrew Zisserman. Very Deep Convolutional Networks for Large-Scale Image Recognition. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1409.1556>
8. Alex Krizhevsky, Ilya Sutskever, Geoffrey E. Hinton. ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks. *Advances in Neural Information Processing Systems 25 (NIPS 2012)*. 2012. URL: <https://papers.nips.cc/paper/2012/hash/c399862d3b9d6b76c8436e924a68c45b-Abstract.html>
9. ImageNet database. URL: <https://www.image-net.org/>
10. Ramprasaath R. Selvaraju, Michael Cogswell et al. Grad-CAM: Visual Explanations from Deep Networks via Gradient-based Localization. *International Conference on Computer Vision (ICCV'17)*. 2017. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1610.02391>

Galagan R.M., Andreiev S.M., Petryk V.F., Bazhenov V.G., Lysenko L.L.

DETECTION OF DEFECTS IN CONCRETE STRUCTURES BASED ON IMAGE ANALYSIS USING CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORKS

Timely detection of external defects of concrete structures (in particular, concrete walls, concrete bridge supports) is an urgent task, as their uncontrolled development can lead to destruction. Today, the main approach to assessing the external condition of concrete structures is visual inspection or human analysis of photographs, which introduces a subjective factor and does not allow for automated analysis and decision-making. One of the ways to automate the process of defect detection and analysis is the use of neural network technologies.

This paper describes the structure of the software used for automated defect detection in images of concrete structures. Software consists of three modules: an image preprocessing module, a classification module, and an automatic analysis and visualization module. Due to its modularity, the software is easy to maintain, expand, and introduce new functionality.

It is proposed to use the VGG16 convolutional neural network, which allows to achieve greater accuracy on a smaller amount of data compared to similar implementations. It is shown that the VGG16 network in the Transfer Learning mode is the most optimal for solving the tasks. The neural network model used is configured to perform binary classification (defective and defect-free area). However, it has the potential for expansion and the ability to perform classification by different types of defects. The developed software was applied to a set of images of CODEBRIM concrete elements of bridge structures, to which were also added own images taken with a digital camera in daylight. After training, the network made it possible to detect defects such as cracks and chips with a precision of 96.3%.

Key words: concrete structure, concrete defect, image analysis, neural network, VGG16.

УДК 004.75

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.2.1/23>**Гузь Д.Р.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Штіфзон О.Й.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Новіков П.В.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Любицький С.В.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ СТАНУ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА НА БАЗІ ІОТ ПРИСТРОЮ

В сучасних умовах спостереження за станом навколишнього середовища відіграє значну роль, особливо на фоні кліматичних змін по всій планеті. Одним із основних параметрів якості навколишнього середовища вважають чистоту повітря. У світі відоме значення AQI, індекс якості повітря, параметр, що використовується для повідомлення громадськості про рівень забруднення повітря у певний момент часу. Хоча всесвітні організації працюють над поліпшенням контролю якості повітря, українська система моніторингу якості повітря не оновлювалась десятками років і, на жаль, не може надавати актуальну в часі інформацію про стан повітря. Вдалим рішенням щодо модернізації вже наявних системи спостереження за параметрами довкілля є залучення нових технологій Інтернету речей з використанням енергоефективних Smart-сенсорів і технологій передачі даних на великій відстані. Проведено аналіз існуючих технологій для застосування в системах схожого характеру, наприклад LoRaWAN, Narrowband-IoT, Sigfox, Zigbee. Для розробки Smart-датчику застосовано RISC-V мікроконтролер ESP32 із LoRa-модемом. Спроектвана друкована плата граничного пристрою з всіма необхідними елементами: системою живлення, периферійними компонентами, засоби комунікації, датчиками. Проведено аналіз енергоспоживання в різних режимах роботи процесора. Побудована структурна схема сервера мережі LoRaWAN. Пристрій може інтегруватися в системи моніторингу, які здійснюють спостереження за віддаленими об'єктами на місцевості в умовах міста, а також і міжміській та польовій місцевостях, збирати дані про стан параметрів на об'єкті, забезпечувати надійну передачу та збереження даних, а також вчасно інформувати користувача про перебіг подій та відхилення ключових параметрів від номіналу. Передбачена можливість масштабування системи моніторингу із додаванням пристроїв у вже налаштовану мережу. Завдяки цьому можна здійснити поступовий перехід від застарілих технологій, що використовуються зараз для виконання моніторингу довкілля, скоротивши початкові капітальні витрати і заощаджуючи бюджет в довготерміновій перспективі.

Ключові слова: моніторинг навколишнього середовища, LORAWAN, ESP32, Інтернет речей, граничний пристрій, шлюз.

Постановка проблеми. В сучасних умовах спостереження за станом навколишнього середовища відіграє значну роль, особливо на фоні кліматичних змін по всій планеті. Станом на 2023 рік питання забруднення Землі звучить все частіше. Екологічна ситуація з плином часу та розвитком глобальної індустріалізації погіршується стрімкими темпами. Одним із основних параметрів

якості навколишнього середовища вважають чистоту повітря. У світі відоме значення "AQI (Air quality index)" [1], індекс якості повітря, параметр, що використовується для повідомлення громадськості про рівень забруднення повітря у певний момент часу. Збір даних з віддалених точок, розподілених по великій території, може слугувати дієвим інструментом для відстежування

та прогнозування параметрів навколишнього середовища.

В більшості європейських країн, США, Канаді, Південно-Західній Азії створені національні мережі станцій контролю атмосферного повітря в онлайн режимі. Такі станції контролюють основні забруднювачі атмосфери, які виникають у різноманітних процесах горіння в енергетиці, транспорті та промисловості: оксид вуглецю, діоксид сірки, оксиди азоту, озон, частинки пилу розміром 2,5 мкм і 10 мкм, також метеопараметри [2].

Хоча всесвітні організації працюють над поліпшенням контролю якості повітря, українська система моніторингу якості повітря не оновлювалась десятками років і, на жаль, не може надавати актуальну в часі інформацію про стан повітря, як це слід робити в умовах сучасності [3]. З огляду на осередки металургії в Україні, поширеність ТЕЦ та ТЕС, хімічних виробництв, моніторинг якості повітря навколишнього середовища є актуальною задачею.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Вдалим рішенням щодо модернізації вже наявних системи спостереження за параметрами довкілля є залучення нових технологій інтернету речей з використанням енергоефективних Smart-сенсорів і технологій передачі даних на великій відстані.

Типова система моніторингу складається з:

- граничного пристрою (device + sensors) що реалізує збір інформації з сенсорів по місцю встановлення;
- шлюза обробки даних (gateway) який забезпечує маршрутизацію пакетів від серверу до пристроїв та у зворотному напрямку;
- серверної частини – мережевий сервер, що опрацьовує відправку даних від базової

станції у хмарний сервіс обробки і архівування (cloud). Користувачі системи за допомогою WEB-інтерфейсу або мобільного додатку мають доступ до хмарного сервісу через розвинений користувацький інтерфейс, де дані відображаються у вигляді графіків, діаграм, зведених таблиць тощо (dashboard).

Запропоновану систему наведено на рис. 1. На нижньому рівні працює мікроконтролерний пристрій із встановленими на ньому датчиками, що збиратиме інформацію для передачі на вищий рівень.

Сьогодні існують варіації технологій для застосування в системах схожого характеру, наприклад LoRaWAN, Narrowband-IoT, Sigfox, Zigbee та інші. Усі вони в міру схожі між собою, деякі працюють на однаковій частоті, проте реалізація протоколів різниться. Основні характеристики цих технологій порівняно на діаграмі рис. 2 [4].

NB-IoT було створено спеціально з урахуванням малопотужних стаціонарних датчиків, пропонує широкі зони покриття з глибоким проникненням у приміщеннях. Протокол підтримується основними операторами мобільного зв'язку.

На відміну від LoRaWAN, це ліцензований протокол, який, ймовірно, коштуватиме дорожче в довгостроковій перспективі, хоч і можливо забезпечить кращий загальний досвід для кінцевих користувачів [5].

На європейському ринку популярності набирає SigFox для промислових рішень, проте компанія позиціонує себе як оператор зв'язку, тому через закритість використання не слід дивитися в сторону цього протоколу в першу чергу [4].

Zigbee базується на стандарті персональної мережі IEEE 802.15.4 [6]. Тому певною мірою вважається альтернативою Wi-Fi і Bluetooth для

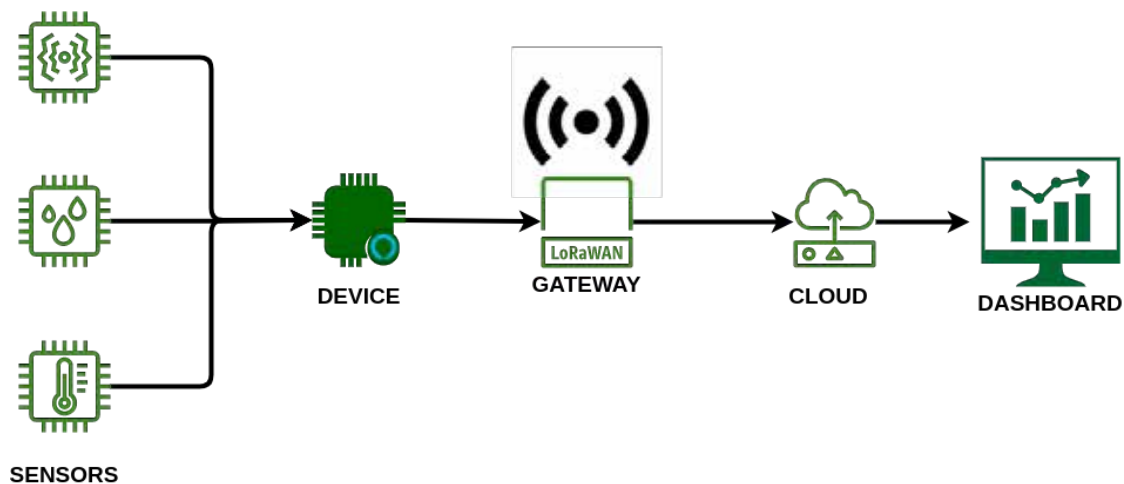


Рис. 1. Принципова схема системи моніторингу

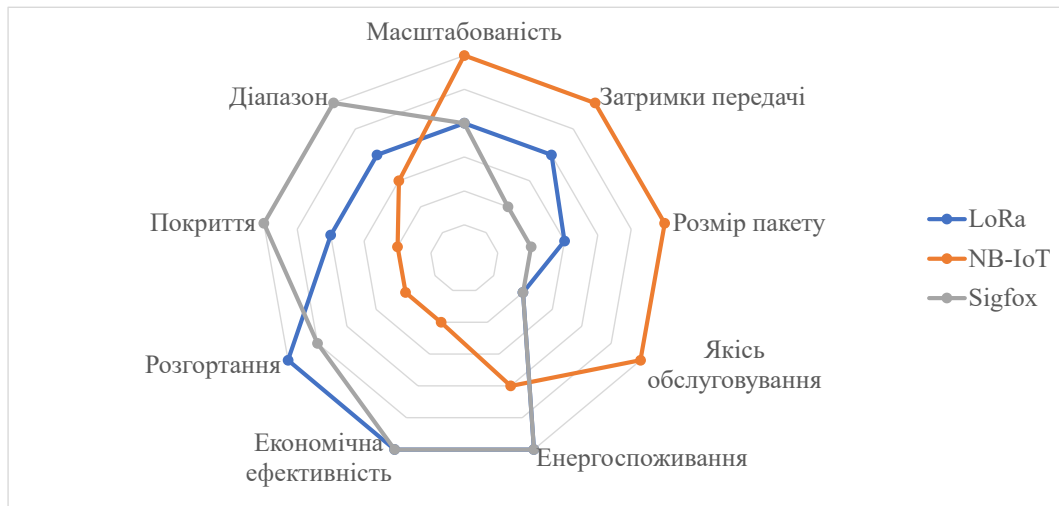


Рис. 2. Порівняння бездротових технологій комунікації

деяких застосувань, у тому числі для пристроїв з низьким споживанням енергії, які не вимагають великого енергоспоживання – наприклад, датчики розумного будинку. Проте для покриття міської площі великою мережею чи використання у польових умовах він не підходить.

Тут варто згадати перелік до двох найбільш зручних стандартів та виділити кілька пунктів:

- LoRaWAN споживає менше електроенергії порівняно з NB-IoT, що робить його більш життєздатним рішенням для проектів, які потребують вищої частоти оновлення.

- Оскільки LoRaWAN споживає менше енергії, він також забезпечує довший час роботи акумулятора порівняно з NB-IoT (15+ років порівняно з 10+ роками).

- За пропускну здатністю та покриттям обидва стандарти є рівноцінними.

- Пікова пропускну здатність для NB-IoT становить 60 Кбіт/с, що вище, ніж у LoRaWAN.

- NB-IoT є більш безпечним рішенням завдяки 256-бітному шифруванню 3GPP (у порівнянні зі 128-бітним AES для LoRaWAN).

- Затримка на NB-IoT іноді нижча, ніж на LoRaWAN. Хоча й затримка на LoRaWAN залежить від типу використовуваного пристрою та його класифікації.

- Обидва стандарти однаково підтримують геолокацію.

У випадку застосування LoRaWAN, дещо ширшим буде вибір готової продукції та компонентів, що використовуються у цьому стандарті, адже для цього не потрібне ліцензування, що й у свою чергу робить ціну доступнішою у порівнянні із NB-IoT [7].

Тому з урахуванням сказаного вище, при розробці такої системи вдалим буде застосувати недорогий та популярний RISC-V мікроконтролер ESP32 із LoRa-модемом на борту в якості граничного пристрою. Таке рішення забезпечить:

- 128-бітне шифрування при передачі даних
- Низькі енерговитрати (режими глибокого сну на боці МК)
- Порівняно низьку вартість готового пристрою
- Велику відстань передачі

Існують вже розроблені продукти схожого спрямування. Пропозиція на ринку попередніх років мала перелік пристроїв на процесорах сімейства STM32 зі схожими модулями LPWAN-технології (NB-IoT та ZigBee), які через кризу напівпровідникового виробництва є важкодоступними [8].

Традиційна топологія для LoRa мережі – зірка, коли багато кінцевих пристроїв спілкуються із одним шлюзом, а він у свою чергу забезпечує комунікацію із мережевим сервером. Частим випадком для промислових застосувань є використання кількох шлюзів обробки для покриття сигналом більшої площі. В теорії також можливий сценарій, коли навіть на малій місцевості пропускну здатності одного шлюза буде недостатньо (як правило це до 10 000 пристроїв одночасно в мережі), тоді слід збільшити кількість шлюзів у системі. Таке рішення забезпечить ширші можливості зв'язку, проте відповідно й збільшить вартість системи за рахунок додаткових шлюзових пристроїв.

Пристрій надсилає дані до шлюзу передачі даних (gateway) на частоті 868 МГц, що має доступ до мережі Інтернет. Як правило, задля кращої швидкодії шлюз підключений через Ethernet

інтерфейс, якщо це дозволяє місце його використання. Проте якщо розташування його не передбачає такої можливості, то більшість сучасних шлюзів мають можливість підключення до Інтернету через стільникову мережу 3G/LTE [9]. Сьогодні в Україні найбільші оператори мобільного зв'язку також пропонують вигідні тарифи для Smart-девайсів, що робить такий спосіб підключення зручним.

Розробка апаратної частини граничного пристрою

Для мікроконтролера на базі процесора ESP32 як джерело живлення застосовується літій-іонний акумулятор та сонячна панель, що в більшу частину року даватиме хороші результати автономності, з огляду на те, що в основному контролер працюватиме в режимі глибокого сну і «прокидатиметься» для опитування датчиків та відправки пакету даних [10]. В якості модуля передавача даних 868 МГц із підтримкою протоколу LoRa обрано Semtech SX1278 як один із надійних, широкоживаних і доступних. Що ж до датчиків температури, вологості та якості повітря, то зазвичай для бюджетних «домашніх» рішень застосовують датчик температури та відносної вологості повітря DHT11/22, AM2032 датчик якості повітря MQ-135 або ж їх аналоги. Та за можливості краще було б обрати багатофункціональний і надійний датчик Bosch BME680, що має можливість вимірювання температури, відносної вологості, барометричного тиску, широкого спектру газів та летючих органічних сполук, що великою мірою впливають на AQI.

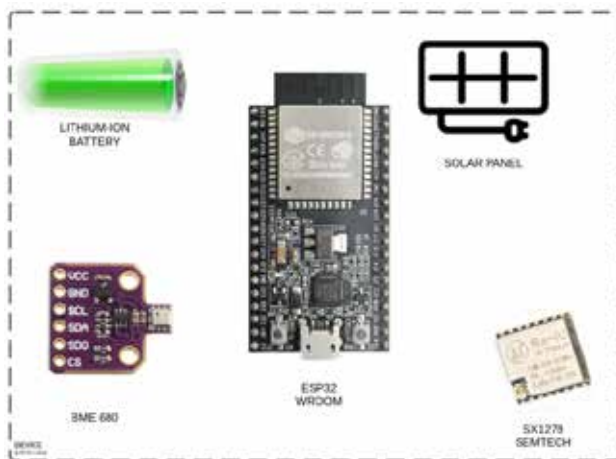


Рис. 3. Компоненти Smart-датчику вимірювання стану навколишнього середовища

Модуль розробника монтується у дві 15-контактні колодки, що можуть бути розташовані на друкованій платі. LoRa модуль має антенний вихід,

до якого підключена SMA-антена 868 МГц через зручний конектор. Для підтримання роботи такої системи в умовах відсутності мережевого струму обрано збірку із двох акумуляторних батарей типорозміру 18650 з напругою 3.7 В. Основний спосіб живлення схеми – мережеве підключення по місцю, але також передбачається резервне підживлення батарей посередництвом дообладнання монокристалічною сонячною панеллю 1...5 Вт, що пасуватиме до розмірів корпусу готового пристрою. В таблиці 1 наведені характеристики режимів енергоспоживання мікроконтролера [11]. У звичайному режимі Active Mode споживання струму при роботі становить 160 ... 260 мА, а в окремих випадках досягає 790 мА. Застосовуючи режим «глибокого сну» (Deep Sleep) можна забезпечити 16-70 кратне заощадження споживаної енергії. В режимі глибокого сну активними залишаються лише годинник реального часу та низькопотужний сопроцесор плати мікроконтролера.

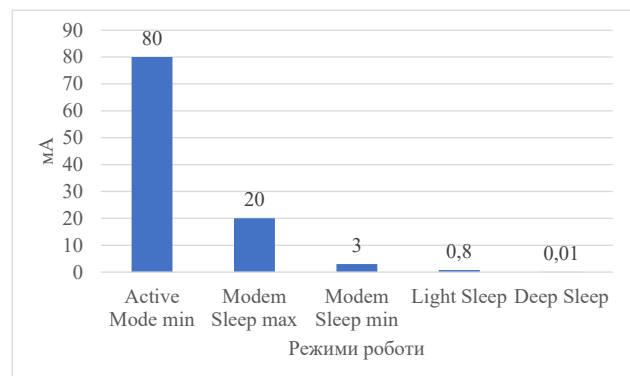


Рис. 4. Енергоспоживання плати Smart-датчику при різних режимах роботи

Багатофункціональний сенсор BME680 Bosch підключений через I2C інтерфейс, по якому відбувається шляхом отримання параметрів опитування його за адресою, якими оперує система в подальшому на інших рівнях. На рис. 5 показана спроектована друкована плата граничного пристрою, де:

1. Сенсор BME680
2. RF-модуль LoRa SX1278
3. SMA вивідна антена
4. Модуль заряду TP4056
5. Корпус для акумуляторів типорозміру 18650

Розробка програмної частини

Як платформу для розгортання серверного back-end для LoRa-мережі, запропоновано обрати ChirpStack.

ChirpStack – це мережевий сервер LoRaWAN з відкритим кодом, який можна використовувати для налаштування мереж LoRaWAN. ChirpStack

Характеристики режимів споживання електроенергії

Компонент плати	Режим роботи			
	Active mode	Modem Sleep	Light Sleep	Deep Sleep
Процесор ESP32	–	–	–	-
Низькопотужний сопроцесор	–	–	–	–
Годинник реального часу	–	–	–	–
Wifi	–	-	-	-
Bluetooth	–	-	-	-
Радіоканал	–	-	-	-
Живлення периферії	–	-	-	-
Загальне енерго-споживання	80-260 мА	3-20 мА	0.8 мА	10 мкА

надає веб-інтерфейс для керування шлюзами, пристроями, а також для налаштування інтеграції даних із основними хмарними (cloud) провайдерами, базами даних і службами, які зазвичай використовуються для обробки даних пристроїв. ChirpStack надає API (Application Programming Interface – прикладний програмний інтерфейс для взаємодії із функціоналом) на основі gRPC, який можна використовувати для інтеграції чи розширення ChirpStack.

gRPC – це сучасна високопродуктивна платформа Remote Procedure Call (RPC) з відкритим кодом, яка може працювати в будь-якому середовищі. Вона може ефективно підключати служби в центрах обробки даних і з їх допомогою підключається підтримка для балансування навантаження, трасування, перевірки працездатності та автентифікації. Він також застосовний в останньому етапі розподілених обчислень для підключення пристроїв, мобільних програм і браузерів до серверних служб.

Структура схема сервера мережі LoRaWAN представлена на рис. 7.

Gateway Bridge – певний міст між програмою Packet Forwarder, встановленою на базовій станції (шлюзі) і безпосередньо структурою сервера LoRaWAN;

Мережевий сервер – мережевий сервер, що обробляє повідомлення мережевого рівня;

Application Server – сервер додатків, що забезпечує роботу мережі на рівні користувача, здійснює інтеграцію із зовнішніми платформами.

Допоміжні складники:

MQTT Broker Mosquitto – для внутрішнього обміну повідомленнями між компонентами сервера;

Redis - проміжна база даних для зберігання швидкоплинних даних;

PostgreSQL – база даних для постійного зберігання даних. Усе використане ПЗ має ліцензію з відкритим вихідним кодом.

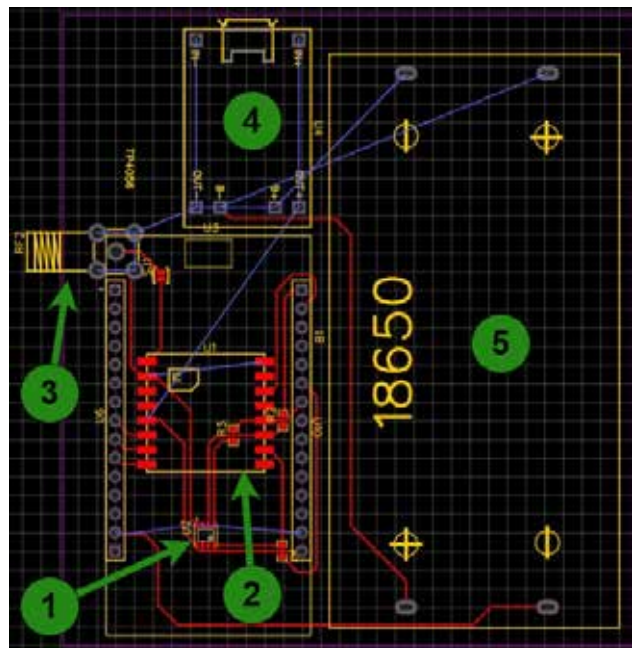


Рис. 5. Схема компонентів друкованої плати

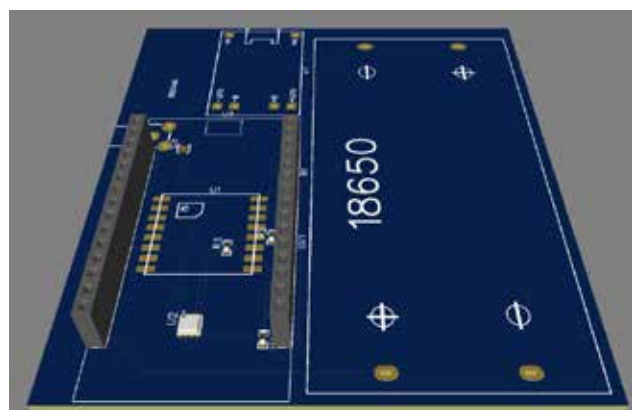


Рис. 6. Відображення друкованої плати в об'ємі

Середовище розробки програмного забезпечення Arduino IDE підтримує плати з мікропроцесорами ESP32 [12]. Це дає можливість швидкого старту розробки прототипів рішень із порівняно низьким порогом входу. Водночас це відкриває

можливості застосування багатьох бібліотек для безлічі інтерфейсів і протоколів, що, як правило, підтримуються спільнотою розробників.

В робочому циклі програми пристрій після ініціалізації інтерфейсів опитує сенсор, відправляє дані на сервер та відправляється у deep-sleep режим, споживаючи мінімум струму до наступного виходу в ефір.

Мікроконтролер публікує свої вимірювання на MQTT брокер (рис. 8).

Mqtt-in вузли “monitoring-esp32/...” спрямовують повідомлення із брокера у потік, де вони опрацьовуватимуться (рис. 9). Створено 4 графіки, що відображають вхідні параметри: Temperature Chart (графік температури), Pressure Chart (графік тиску), Humidity Chart (графік вологості), Gas Resistance Chart (графік) (рис. 10).

Дані із графіків архівуються в текстові файли у json-форматі в локальне сховище пристрою, на якому працює Node-RED.

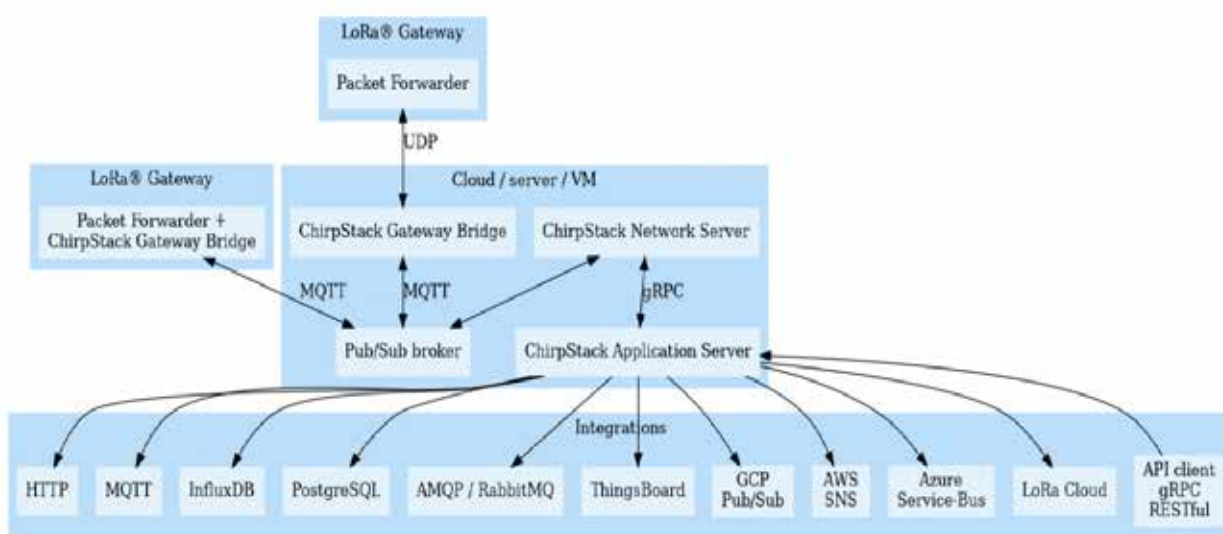


Рис. 7. Структура схема сервера мережі LoRaWAN

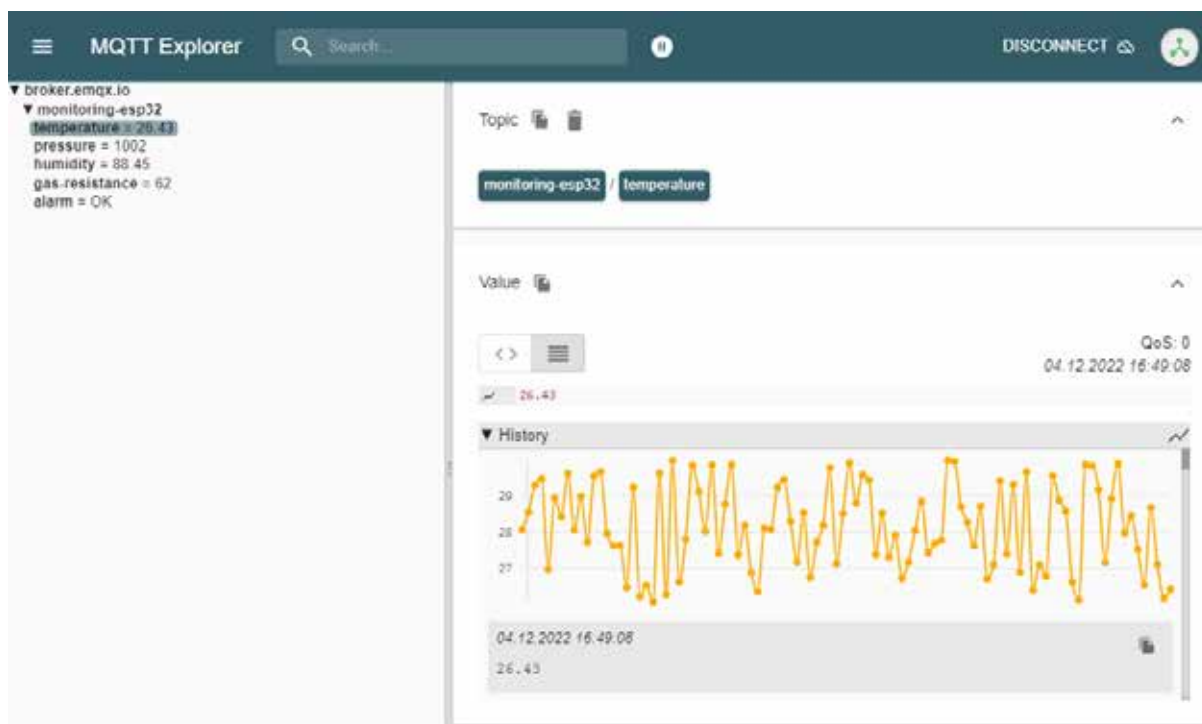


Рис. 8. Отримані із пристрою дані топіку температури “temperature”

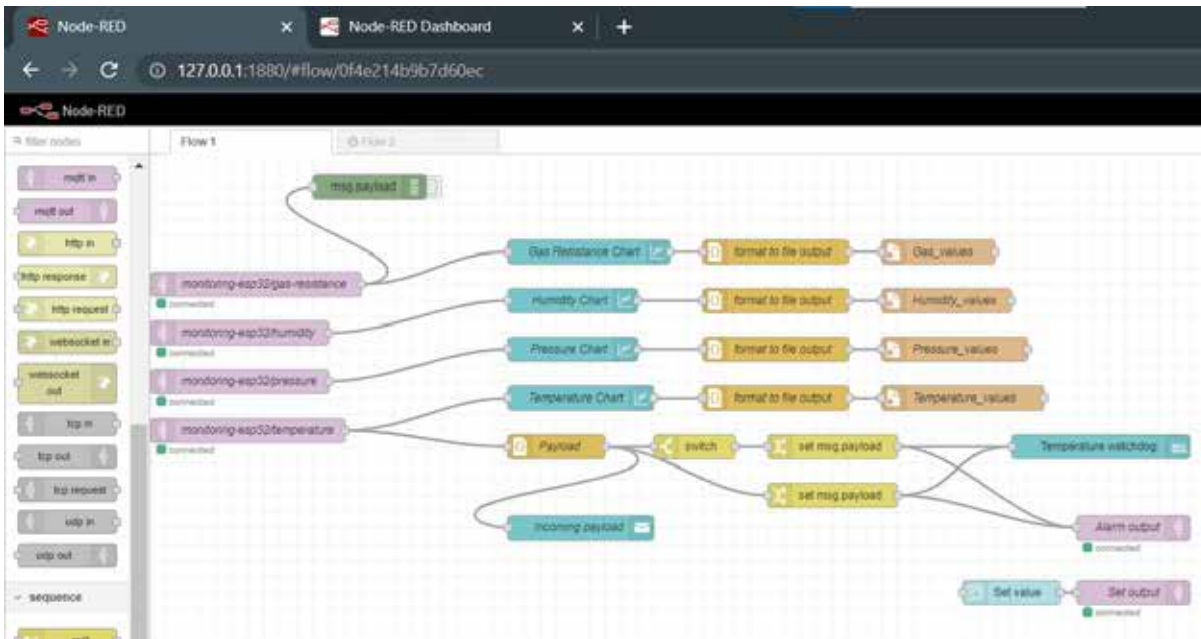


Рис. 9. Потоки для значень параметрів

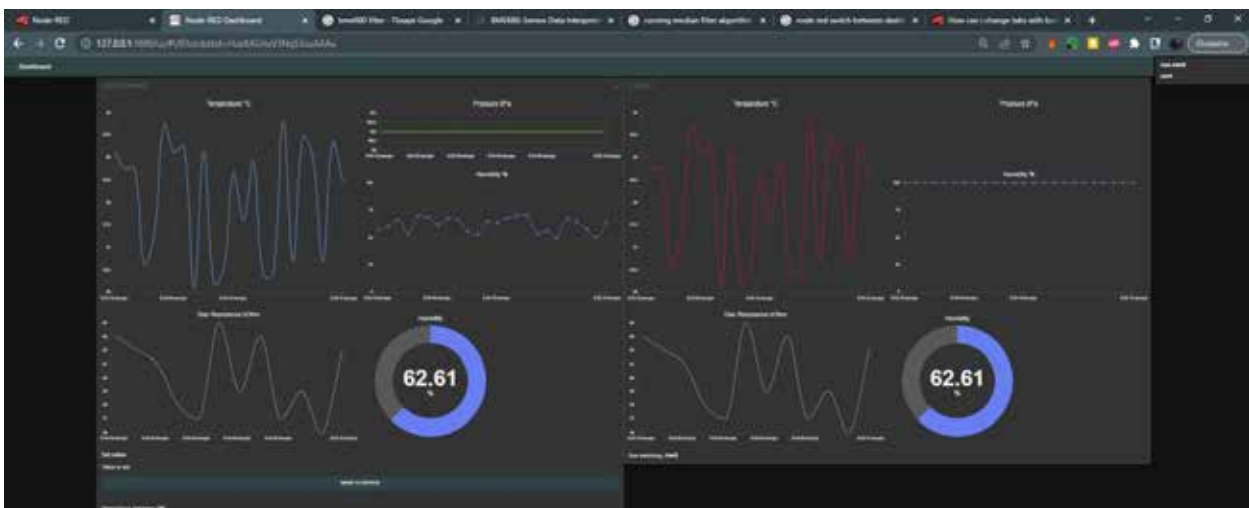


Рис. 10. Панель відображення (Dashboard) пристроїв системи моніторингу

При масштабованій системі моніторингу пристрої відображаються в форматі послідовного списку, коли кожен із них можна згорнути. Сповіщення про події в панель оператора надходять також в порядку черги, рис. 10.

Висновки

Ефективність роботи системи моніторингу стану навколишнього середовища ґрунтується на надійних, мобільних, гнучких в застосуванні і енергоефективних кінцевих пристроях. В сучасних умовах такі пристрої повинні бути оснащені енергоефективними мікропроцесорами, засобами бездротової комунікації, широким набором інтерфейсів для підключення периферійних пристроїв, мати можливість гнучкого конфігурування та програмування.

Розроблений пристрій системи моніторингу стану навколишнього середовища складається із загально доступних компонентів. Низьке енергоспоживання дозволяє зменшити витрати на заміну елементів живлення і на їх обслуговування. Програмне забезпечення розроблене за допомогою відкритих засобів і бібліотек.

Для комунікації пристроїв з шлюзом передачі даних застосовано технологію LoRa. Це дозволяє здійснювати комунікацію між пристроями на великих відстанях, при цьому забезпечувати понижене енергоспоживання. Передача даних здійснюється за відкритим протоколом MQTT.

Пристрій може інтегруватися в системи моніторингу, які здійснюють спостереження за відда-

леними об'єктами на місцевості в умовах міста, а також і міжміській та польовій місцевостях, збирати дані про стан параметрів на об'єкті, забезпечувати надійну передачу та збереження даних, а також вчасно інформувати користувача про перебіг подій та відхилення ключових параметрів від номіналу.

Важливо зауважити на можливості масштабування системи моніторингу із додаванням пристроїв у вже налаштовану мережу. Завдяки цьому можна здійснити поступовий перехід від застарілих технологій, що використовуються зараз для виконання моніторингу довкілля, скоротивши початкові капітальні витрати і заощаджуючи бюджет в довготерміновій перспективі.

Список літератури:

1. Suman. (2021) Air quality indices: A review of methods to interpret air quality status. *Materials Today: Proceedings*. Volume 34, Part 3, p. 863-868. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.141>
2. ДСТУ ISO 8756:2008 Якість повітря. Оброблення даних за температурою, тиском та відносною вологістю (ISO 8756:1994, IDT).
3. «Створення ефективної системи моніторингу довкілля в Україні: проблеми і шляхи їх вирішення». Аналітична записка <https://niss.gov.ua/doslidzhennya/nacionalna-bezpeka/stvorennya-efektivnoi-sistemi-monitoringu-dovkillya-v-ukraini>
4. «Sigfox. LoRa. NB-IoT. Easy guide to who does it best» 2018, [Електронний ресурс] - <https://www.iotsolutions.com/mt/post/sigfox-vs-lora-vs-nb-iot-who-s-doing-it-best>
5. Muteba, K.F., Djouani, K., Olwal, T. (2022). 5G NB-IoT: Design, Considerations, Solutions and Challenges. *Procedia Computer Science*. Volume 198, p. 86-93. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.12.214>
6. Anthony S. Deese, Julian Daum. (2018). Application of ZigBee-Based Internet of Things Technology to Demand Response in Smart Grids. *IFAC-PapersOnLine*. Volume 51, Issue 28. p. 43-48. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.11.675>
7. Technical Overview of LoRa and LoRaWAN, TÜV Rheinland, 2015.
8. Світовий дефіцит мікрочипів у розпалі: як зростають ціни на техніку та авто. Українська правда. <https://www.epravda.com.ua/publications/2021/07/12/675833/>
9. Integration of LoRaWAN and 4G/5G for the Industrial Internet of Things, IEEE Communications Magazine 2018.
10. Semtech “LoRa and LoRaWAN: A Technical Overview” Technical Paper, 2020, Режим доступу: https://lora-developers.semtech.com/uploads/documents/files/LoRa_and_LoRaWAN-A_Tech_Overview-Downloadable.pdf
11. Insight Into ESP32 Sleep Modes & Their Power Consumption. Last minute engineers. <https://lastminuteengineers.com/esp32-sleep-modes-power-consumption/>
12. Neil Kolban “Kolban's Book on ESP32” 2018

Huz D.R., Shtifzon O.Yo., Novikov P.V., Liubyt'skyi S.V. ENVIRONMENTAL CONDITION MONITORING SYSTEM BASED ON IOT DEVICE

In modern conditions, monitoring the state of the environment plays a significant role, especially against the background of climate changes throughout the planet. Air purity is considered one of the main parameters of environmental quality. The world is known for AQI, Air Quality Index, a parameter used to inform the public about the level of air pollution at a given time. Although international organizations are working to improve air quality control, the Ukrainian air quality monitoring system has not been updated for decades and, unfortunately, cannot provide up-to-date information on air conditions. A successful solution for the modernization of existing systems for monitoring environmental parameters is the involvement of new Internet of Things technologies using energy-efficient Smart sensors and long-distance data transmission technologies. An analysis of existing technologies for use in systems of a similar nature, such as LoRaWAN, Narrowband-IoT, Sigfox, Zigbee, was carried out. A RISC-V ESP32 microcontroller with an on-board LoRa modem as a boundary device was used to develop the Smart sensor. The printed circuit board of the boundary device is designed with all the necessary elements: power system, peripheral components, means of communication, sensors. An analysis of energy consumption in different processor operating modes was carried out. The structural diagram of the LoRaWAN network server is built. The device can be integrated into monitoring systems that monitor remote objects on the ground in city conditions, as well as in intercity and field areas, collect data on the state of parameters at the object, ensure reliable data transmission and storage, and also provide timely information the user about the course of events and the deviation of key parameters from the nominal value. It is important to note the possibility of scaling the monitoring system by adding devices to an already configured network. This allows for a gradual transition from the outdated technologies currently used to perform environmental monitoring, reducing initial capital costs and saving the budget in the long term.

Key words: environmental monitoring, LORAWAN, ESP32, Internet of Things, edge device, gateway.

УДК 519.8

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.2.1/24>

Івохін Є.В.

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

Гавриленко В.В.

Національний транспортний університет

Омецинська Н.В.

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

Івохіна К.Є.

Національний транспортний університет

Рудоман Н.В.

Національний транспортний університет

ПРО ОДИН ПІДХІД ДО РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧІ КОМІВОЯЖЕРА ЗА ДОПОМОГОЮ МЕТОДУ ОРЛІНА ОПТИМІЗАЦІЇ ПОТОКІВ ДАНИХ

У статті розглянуто методика послідовного застосування поточкових схем розподілу однорідного ресурсу для розв'язання задачі комівояжера, яка формулюється як задача пошуку маршруту відвідування заданої кількості міст без повторень з мінімальною відстанню руху або тривалістю пересування. Ставиться завдання формалізації алгоритму розв'язання задачі комівояжера за допомогою методу поточкового розподілу ресурсу і використання схеми backtracking (повернення). Запропоновано використання методу Орліна оптимізації розподілу потоку на графі. Коротко викладено зміст методу Орліна, описано схему формалізації процедури використання методу з реалізацією схеми backtracking для розв'язання задачі комівояжера з мінімальною тривалістю руху за маршрутом. Звертається увага, що використання алгоритмів на основі схем пошуку з поверненням при розв'язанні практичних задач суттєво обмежується невисокою швидкістю роботи та підвищеними вимогами до обчислювальних ресурсів. Запропоновано варіант прискорення швидкості роботи розробленого алгоритму, який полягає у залученні жадібної методики у процедурі вибору ділянок маршруту: планування кожного наступного етапу пересування визначається на основі вибору найбільш швидкого напрямку руху. Застосування жадібного підходу дозволяє отримати конструктивну схему розв'язання задачі комівояжера. Наведено результати роботи запропонованого алгоритму для обчислення розв'язків задачі комівояжера з мінімізацією тривалістю руху, проведено порівняння отриманих розв'язків з розв'язками, знайденими іншими точними та евристичними методами. Проведено аналіз впливу жадібного підходу на швидкість роботи розробленого алгоритму. Зроблено висновки й спрогнозовано подальший розвиток розглянутої методики для розв'язання задачі комівояжера з урахуванням суб'єктивного сприйняття плинності часу та динамічної задачі комівояжера.

Ключові слова: задача комівояжера, метод розподілу ресурсів, алгоритм Орліна, схема з поверненням, жадібний підхід.

Вступ. Останнім часом більшість світових компаній зіткнулися з перебоями в логістиці, спричиненими пандемією та війною в Україні. Через санкції та події, які зв'язані з пандемією, менеджери логістичних компаній відчували серйозні збої у визначенні шляхів та обсягів перевезень, оскільки згадані процеси виявили слабкі сторони традиційних існуючих у логістиці ланцюгів поставок.

Відсутність вертикального бачення виробничих процесів та зв'язків, застарілі процеси

управління попитом, недостатня стійкість до змін попиту та несподівані збої через залежність від ручних зусиль у логістичних операціях зруйнували ланцюжок поставок.

Компанії, що займаються логістикою, наразі змушені проаналізувати свої логістичні процеси. Ясно, що зміни в поведінці та очікуваннях клієнтів навряд чи зможуть усунути ці несподівані проблеми логістики, покупці очікували швидшої доставки та зручних можливостей відстеження товарів.

Стає зрозумілим, що компаніям необхідно швидко оптимізувати управління логістикою. Залежно від поставленої задачі, існує багато різних математичних підходів до різних логістичних проблем, такі як лінійне програмування, оптимізація мереж, аналіз рішень, генетичні алгоритми та інше.

Проблеми логістики мають свої труднощі, деякі з яких вирішуються завдяки роботі менеджersького відділу, а інші передбачають аналіз та оптимізацію логістичних операцій, включаючи планування, координацію та контроль руху та зберігання товарів, послуг і інформації, оптимізацію потоків у мережі [1-3]. Завдяки методам і моделям імітаційного моделювання можна створювати комп'ютерні моделі логістичної системи та використовувати їх для тестування різних сценаріїв та оптимізації продуктивності системи.

Залучення математичних підходів для розв'язування логістичних задач набуває широкого впровадження, конкретний зміст якого залежить від характеру проблеми та наявних даних. Іноді вдається знайти нетипові методики розв'язання відомих задач, однією з яких є задача комівояжера.

Постановка задачі комівояжера та аналіз останніх публікацій.

За змістом задачі комівояжера (TSP, Travelling Salesman Problem) необхідно скласти маршрут руху в рамках заданої сукупності зв'язаних між собою пунктів (міст), що утворюють транспортну мережу конкретного регіону [4]. Особливістю задачі є те, що маршрут повинен містити усі пункти, що прописані у завданні, причому, кожен з пунктів потрібно відвідати не більше одного разу. Зрозуміло, що такі подорожі забирають багато часу, тому логічно, що необхідно скласти маршрут таким чином, щоб відстань, яку потрібно подолати, або час подолання були мінімальними (в якості критерію може також розглядатися знаходження шляху з найменшими витратами).

Задача комівояжера – комбінаторна задача, для розв'язання якої можуть бути використані методи математичного програмування. Щоб навести задачу до загального вигляду, пронумеруємо міста числами $(1, 2, 3, \dots, n)$, а маршрут комівояжера опишемо циклічною перестановкою номерів $t = (j_1, j_2, \dots, j_n, j_1)$, причому усі j_1, \dots, j_n – різні номери. Номер j_1 , який повторюється з початку й у кінці, показує, що перестановка є циклічною [5].

Сукупність міст можна розглядати у вигляді вершин деякого графу з заданими відстанями (або часом пересування) між усіма парами вершин c_{ij} , які утворюють матрицю $C = (c_{ij})$, $i, j = \overline{1, n}$. Будемо

вважати матрицю симетричною. Тоді формальне завдання полягає у тому, щоб знайти найкоротший маршрут (за часом або довжиною) t , який проходить через кожне місто та закінчується в точці відправлення. У такій постановці задача називається замкненою задачею комівояжера (TSP), яка є відомою задачею математичного цілочисельного програмування.

Сформулюємо математичну модель задачі TSP. Нехай $I = \{1, \dots, n\}$ – множина індексів вершин графу задачі. Цільова функція – сумарна відстань або час проходження маршруту, що включає у себе усі вершини графу задачі. Параметрами задачі є елементи матриці $C = (c_{ij})$, $i, j \in I$.

Змінними задачі є елементи бінарної матриці переходів між вершинами $X = \{x_{ij}\}$, $i, j \in I$, які дорівнюють 1, якщо у побудованому маршруті для задачі присутнє ребро (v_i, v_j) , 0 – інакше [6]. Оптимальним є найкоротший за відстанню або за часом маршрут:

$$E = \sum_{i \in I} \sum_{j \in I, j \neq i} c_{ij} x_{ij} \rightarrow \min \quad (1)$$

з обмеженнями

$$\sum_{j \in I, j \neq i} x_{ij} = 1, \quad i \in I, \\ \sum_{i \in I, i \neq j} x_{ij} = 1, \quad j \in I, \quad (2)$$

$$v_i - v_j + n x_{ij} \leq n - 1, \quad 1 \leq i \neq j \leq n.$$

Остання нерівність забезпечує зв'язність маршруту обходу вершин, він не може складатися з двох і більше незв'язаних частин.

Алгоритми, що дозволяють вирішити проблему знаходження оптимального маршруту, розподіляють на точні та евристичні. Точні методи гарантують знаходження оптимального розв'язку задачі за певний час або з урахуванням певних ресурсних обмежень. В цьому випадку пошук розв'язків виконується на основі методів оптимізації, таких як лінійне програмування, динамічне програмування або метод гілок та меж [7]. Однак, точні методи доцільно використовувати лише до задач невеликого масштабу (наприклад, з метою первинного проектування транспортної мережі малих розмірів), оскільки для їх реалізації необхідні великі обчислювальні потужності.

З іншого боку, евристичні методи — це алгоритми, які не гарантують знаходження оптимального розв'язку, а натомість спрямовані на швидкий пошук локально оптимального розв'язку. Традиційно використовуються підходи «спроб і помилок», наприклад випадковий пошук або жадібний алгоритм, щоб швидко дослідити простір рішень і знайти перспективний розв'язок [8].

мірності N , елементи якої обчислюються рекурентно за формулою

$$\gamma_r^m(T_1, \dots, T_{N_1}, e'_1, \dots, e'_k) = \left[\sum_{p=1}^M (\beta(e'_1, \dots, e'_k) H^{in} \text{diag}(\gamma_{r-1}(T_1, \dots, T_{N_1}, e'_1, \dots, e'_k))) \right] + \gamma_r^m(T_1, \dots, T_{N_1}, e'_1, \dots, e'_k), \quad (10)$$

$r = \overline{2, R}$, $m = \overline{1, N}$, а сума у першому доданку береться за усіма M елементами m -го рядка матриці $\beta(e'_1, \dots, e'_k) H^{in} \text{diag}(\gamma_{r-1}(T_1, \dots, T_{N_1}, e'_1, \dots, e'_k))$.

В рекурентному виразі (10) початкові значення елементів вектор-функції $\gamma_1(T_1, \dots, T_{N_1}, e'_1, \dots, e'_k)$ і елементи матричної функції $\beta(e'_1, \dots, e'_k)$ визначаються співвідношеннями:

$$\gamma_1^m(T_1, \dots, T_{N_1}, e'_1, \dots, e'_k) = \left[\sum_{p=1}^N (\beta(e'_1, \dots, e'_k) * \text{diag}(v(T_1, \dots, T_{N_1}))) \right]_m, \quad m = \overline{1, N};$$

$$\beta(e'_1, \dots, e'_k) = [(-H^{out}) * \text{diag}(E'(e'_1, \dots, e'_k))]^T. \quad (11)$$

Тоді елементи векторної функції $w(T_1, \dots, T_{N_1}, e'_1, \dots, e'_k)$ визначають елементи вихідної векторної функції $t(T_1, \dots, T_{N_1}, e'_1, \dots, e'_k)$, яка є розв'язком задачі оптимізації (4):

$$t_k(T_1, \dots, T_{N_1}, e'_1, \dots, e'_k) = w_{Q_k}(T_1, \dots, T_{N_1}, e'_1, \dots, e'_k) \quad (12)$$

де Q – вектор розмірності N_3 , елементи якого визначають номери вершин графа $G(V, E)$, що складають підмножину V_e кінцевих пунктів переміщення, $k = \overline{1, K}$.

Зрозуміло, що такий пошук маршруту передбачає залучення методики з поверненням (backtracking) [13]. Розв'язання задачі на основі застосування backtracking зводиться до послідовного розширення частинного розв'язку. Якщо на черговому кроці розширення провести не вдається, то відбувається повернення до більш короткого частинного розв'язку та продовжується пошук далі. Даний алгоритм дозволяє знайти усі розв'язки поставленої задачі, якщо вони існують. Відомо, що використання алгоритмів на основі схеми пошуку з поверненням при розв'язанні практичних задач суттєво обмежується невисокою швидкістю роботи та значними вимогами до обчислювальних ресурсів. Для прискорення роботи методу намагаються організувати обчислення таким чином, щоб якомога раніше виявляти варіанти, які не є оптимальними, або використовувати при побудові кожного кроку схеми відбору на основі жадібного підходу. Це дозволяє значно скоротити час знаходження розв'язку.

Жадібний підхід формулюється відповідно принципу обирати оптимальний розв'язок на кожному кроці, не зважаючи на попередні кроки, які зроблені, або будуть зроблені попереду. Іншими словами, жадібна методика базується на локально оптимальному виборі із сподіванням, що цей вибір приведе до глобально оптимального розв'язку.

Потрібно зауважити, що не існує можливості перевірки якості застосування жадібних алгоритмів у розв'язуванні конкретної прикладної задачі, однак для задач, в яких послідовність локальних оптимумів прямує до глобального оптимального розв'язку даний підхід є дуже перспективним.

Жадібна методика, що пропонується авторами, передбачає розгляд на кожному етапі формування маршруту найбільш швидкісного за часом напряму руху. Комбінований підхід на основі методу розподілу ресурсу та жадібного вибору напряму руху дозволив реалізувати конструктивну схему розв'язання задачі комівояжера.

В результаті проведених обчислювальних експериментів (див. прикл. у табл. 1) встановлено ефективність використання розробленого алгоритму.

Таблиця 1

Порівняння часу пошуку та розв'язків задачі комівояжера ($N=10$)

Метод розрахунку	Час роботи	Оптимальний розв'язок	Характеристика розв'язку
Повний перебір	30 сек	117 год	Точний
Жадібний алгоритм	17 сек	129 год	Наближений
Метод відпалу	11 сек	142 год	Наближений
Запропонований алгоритм	21 сек	127 год	Наближений

Планується подальше вдосконалення запропонованого підходу на основі впровадження інших принципів жадібного вибору напрямів руху та його застосування для вирішення нечітких та динамічних задач комівояжера.

Висновки. В роботі розглянуто спосіб формалізації алгоритму розв'язання задачі комівояжера за допомогою методу потокового розподілу ресурсу і використання схеми backtracking (повернення). Запропоновано використання методу Орліна оптимізації розподілу потоку на графі. Коротко описано схему формалізації процедури використання методу з реалізацією схеми backtracking для розв'язання задачі комівояжера з мінімальною тривалістю руху за маршрутом. Запропоновано варіант прискорення швидкості роботи розробленого алгоритму, який полягає у залученні жадібної методики у процедурі вибору ділянок маршруту: планування кожного наступного етапу пересування визначається на основі вибору найбільш швидкого напряму руху, що дозволяє отримати конструктивну схему розв'язання задачі

комівояжера. Наведено результати роботи запропонованого алгоритму для обчислення розв'язків задачі комівояжера з мінімізацією тривалістю руху, проведено порівняння отриманих розв'язків з розв'язками, знайденими відомими точними

та евристичними методами. Проведено аналіз впливу жадібного підходу на швидкість роботи розроблено алгоритму. Зроблено висновки, запропоновано подальший розвиток запропонованої методики для розв'язання задач комівояжера.

Список літератури:

1. Martin Christopher. Logistics and Supply Chain Management. – FT Publishing International, 5th edition, 2016. 328 p.
2. Alan Harrison, Remko van Hoek. Logistics Management and Strategy. – Financial Times Management, 2nd edition, 2005. 308 p.
3. Gianpaolo Ghiani, Gilbert Laporte, Roberto Musmanno. Introduction to Logistics Systems Planning and Control. – John Wiley & Sons, Ltd, 2004. 377 p.
4. Зайченко Ю.П. Дослідження операцій. К.: Видавничий дім «Слово», 2006. 816 с.
5. Гребеннік І.В., Чорна О.С., Макарова Е.Е. Оптимізація лінійних функцій на множині циклічних перестановок з лінійними обмеженнями. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2018. №3(49). С.67-72.
6. Vanderbei R. J. Linear programming: Foundations and extensions. – Springer, 2014. – 414 p.
7. Korte B., Vygen J., Combinatorial Optimization: Theory and Algorithms (Algorithms and Combinatorics). – Springer Berlin, Heidelberg, 2018. 455 p.
8. Larissa T. Moss, Shaku Atre. Business Intelligence Roadmap: The Complete Project Lifecycle for Decision-Support Applications. Addison-Wesley Professional, 2003. – 576 p.
9. Кононюк А.Ю. Нейронні мережі і генетичні алгоритми. К.: «Корнійчук», 2008. 446 с.
10. Ajay D. Kshemkalyani, Mukesh Singhal. Distributed Computing: Principles, Algorithms, and Systems, Cambridge University Press, 2011. 756 p.
11. Rai S., Ettam R. K. Simulation-based optimization using simulated annealing for optimal equipment selection within print production environments// Winter Simulations Conference (WSC), 2013. Pp.1097-1108.
12. Orlin J.B. A Faster Strongly Polynomial Algorithm for the Minimum Cost Flow Problem// Operations Research, 1993. V. 41. – N. 2. Pp.338-350.
13. Watson Des. A Practical Approach to Compiler Construction. Springer, 2017. 254 p.
14. Vasek Chvatal, William J. Cook, George B. Dantzig, Delbert Ray Fulkerson, Selmer M. Johnson. Solution of a large-scale traveling-salesman problem/ In 50 Years of Integer Programming 1958-2008. From the Early Years to the State-of-the-Art, 2010. Pp. 7-28.

Ivohin E.V., Gavrilenko V.V., Ometsynska N.V., Ivohina K.E., Rudoman N.V. ON ONE APPROACH TO SOLVING THE TRAVELING SALESMAN PROBLEM USING THE ORLIN METHOD OF OPTIMIZING DATA FLOWS

The scientific article is devoted to a technique for the sequential application of flow schemes for distributing a homogeneous resource for solving the traveling salesman problem, which is formulated as the problem of finding a route to visit a given number of cities without repetitions with a minimum distance of movement or duration of movement. The task of formalizing the algorithm for solving the traveling salesman problem by the method of streaming resource distribution and using the backtracking scheme (return) is posed. The use of Orlin's method to optimize the flow distribution on the graph is proposed. The content of the Orlin method is briefly outlined, a scheme for formalizing the procedure for using the method with the implementation of the backtracking scheme for solving the traveling salesman problem with the minimum duration of movement along the route is described. Attention is drawn to the fact that the use of algorithms based on backtracking schemes in solving practical problems is significantly limited by low speed and increased resource intensity. A variant of accelerating the speed of the developed algorithm is proposed, which consists in using a greedy technique in the procedure for choosing sections of the route: the planning of each next stage of movement is determined based on the choice of the fastest direction of movement. The application of the greedy approach makes it possible to obtain a constructive scheme for solving the traveling salesman problem. The results of the proposed algorithm for calculating solutions to the traveling salesman problem with minimization of the duration of movement are presented, the obtained solutions are compared with the solutions found by known exact and heuristic methods. The influence of the greedy approach on the speed of the developed algorithm was analyzed. Conclusions are drawn, further development of the proposed technique for solving the traveling salesman problem is proposed, taking into account the subjective perception of the time passage and the dynamic traveling salesman problem based on the annealing method.

Key words: traveling salesman problem, resource allocation method, Orlin's algorithm, backtracking scheme, greedy approach.

Кандиба І.О.

Чорноморський національний університет імені Петра Могили

Фісун М.Т.

Чорноморський національний університет імені Петра Могили

Горбань Г.В.

Чорноморський національний університет імені Петра Могили

Степанчук Д.К.

Чорноморський національний університет імені Петра Могили

ГЕНЕРАТОР МУЛЬТИАЛФАВІТНИХ СИНТАКСИЧНИХ АНАЛІЗАТОРІВ З ГРАФІЧНИМ ВІДОБРАЖЕННЯМ СИНТАКСИЧНОГО ДЕРЕВА

У статті досліджено особливості реалізації предметно-орієнтованих мов програмування (ПОМ). Виконано аналіз основних досліджень в галузі генераторів синтаксичних аналізаторів: алгоритми реалізації, підвищення швидкодії, особливості інтеграції генерованих аналізаторів з мовами програмування загального призначення. Проаналізовано існуючі генератори аналізаторів в контексті розробки ПОМ, визначено їх основні недоліки: відсутність підтримки кількох алфавітів у синтаксисі граматики та відсутність засобів візуалізації абстрактного синтаксичного дерева (АСД). Наведено опис особливостей створення генератора аналізаторів на основі опису граматики за нотацією нормальних форм Бекуса-Наура (БНФ). Описано особливості процесу проектування ПОМ за допомогою використання БНФ. Представлено опис частини ПОМ реляційної алгебри у вигляді БНФ. Проаналізовано особливості реалізації ПОМ з використанням методу LL (Left-to-right & Leftmost derivation). Запропоновано реалізацію генерації множин FIRST та FOLLOW для побудови розбору предикативного синтаксичного аналізатора (ПСА). Наведено алгоритм побудови названої таблиці розбору. Описано алгоритм автоматизованої генерації ПСА. Запропоновано найбільш доцільну мову програмування загального призначення для реалізації генератора синтаксичних аналізаторів для ПОМ. Описано недоліки інструментарію відображення АСД у аналогічних синтаксичних генераторах. Наведено опис інструментарію для візуалізації АСД, отриманого в результаті роботи згенерованого аналізатора. Продемонстровано представлення АСД засобами розробленого генератора аналізаторів на прикладі запиту ПОМ реляційної алгебри. Проаналізовано інструментарій Python для роботи різними типами кодування та реалізацією підтримки різних алфавітів. Запропоновано шляхи подальшого розвитку генератору синтаксичних аналізаторів для створення ПОМ.

Ключові слова: ПОМ, генератор аналізаторів, синтаксичний аналіз, Python, Graphviz.

Постановка задачі. ПОМ широко розповсюджені в сучасному світі інформаційних технологій [1 с. 23]: консольні інтерфейси, мови запитів, засоби математичного моделювання тощо. Цей клас мов дозволяє вирішити дві задачі: зменшити синтаксис необхідний для реалізації певних частин програмного коду, та спростити інформаційними технологіями (ІТ) для фахівців предметних галузей, що не мають поглиблених знань з програмування.

Реалізувати синтаксичні аналізатори для ПОМ можливо шляхом написання коду самих аналізаторів або за рахунок генерації цього коду спе-

ціалізованим інструментарієм. Написання коду власноруч є складним та трудомістким процесом, а застосування спеціалізованих інструментів генерації аналізаторів має ряд обмежень [2 с. 3]:

- відсутня або частково підтримується кирилиця, що обмежує синтаксис вхідної мови;
- спеціалізований синтаксис побудови регулярних виразів для обробки лексем, що також має власні обмеження;
- відсутня можливість візуалізації абстрактного синтаксичного дерева (АСД) вхідного коду, що ускладнює процес реалізації семантичного аналізу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Сучасні дослідження синтаксичного аналізу здебільшого присвячені аналізу особливостей методів цього аналізу. У роботі [3 с. 127] автори дослідили швидкодію аналізаторів, що реалізують спадний та підймальні методи синтаксичного аналізу. Це дослідження також демонструє особливості створення аналізаторів з використанням моделі магазинного автомату. Однак, у роботі не розглянуто можливість використання згенерованих аналізаторів на основі зазначених методів та особливостям формального опису граматик вхідної мови.

У роботі [4 с. 5] продемонстровано можливість реалізації аналізатору для visibly pushdown languages (VPL), що є підвидом контекстно-вільних граматик [5 с. 4]. У цьому дослідженні наведено аналіз швидкодії аналізаторів побудованих спеціально для VPL, та генератору аналізаторів ANTLR призначеного для більш широкого кола задач. Наведені в роботі описи алгоритму роботи аналізатору та опис особливостей граматик є дуже детальними, але не недостатньо уваги приділено можливості застосування граматик з використанням різних алфавітів та застосуванню засобів відображення дерева розбору.

Стаття [6 с. 121] містить результат дослідження особливостей реалізації алгоритму синтаксичного аналізу GLR (Generalized Left-to-right Rightmost derivation parser). В ній наведено особливості розширеної форми Бекуса-Наура, задекларованої стандартом ISO/IEC 14977:1996(E) [7] та її аналізу алгоритмом GLR. Однак автори приділяють недостатню увагу дослідженню методи опису граматик, а саме можливості використання кирилиці.

Варто відмітити дослідження продуктивності існуючих генераторів аналізаторів при використанні їх у якості інструменту у навчальному процесі [8 с. 2]. У ньому висвітлюється складність опанування інструментарію генерації аналізаторів та особливості роботи згенерованих аналізаторів: використання генерованих обробників помилок, відображення дерева розбору, тощо. Не зважаючи на велику кількість представлених характеристик аналізаторів більш детального дослідження потребує можливість застосування різних алфавітів в процесі опису правил.

Виконаний аналіз продемонстрував, що сучасні дослідження в галузі розробки генераторів аналізаторів хоча й охоплюють різні аспекти цього процесу, але питання використання різних алфавітів у граматиках вхідних мов та генерації дерев розбору залишаються актуальним. Особливо актуаль-

ними ці питання є при розробці ПОМ, призначених для спрощення роботи фахівців предметних галузей без поглибленого знання інформаційних технологій, що може потребувати використання різних алфавітів, наприклад кирилиці.

Формулювання цілей та завдань. Метою дослідження є покращення usability [9] за рахунок можливості використання в ПОМ різних алфавітів та графічного відображення дерев синтаксичного аналізу.

Створення відповідної інформаційної технології дозволить генерувати синтаксичний аналізатор для ПОМ на основі опису граматик з можливістю використання в описі вхідної мови різних алфавітів. Для досягнення зазначеної мети поставлені наступні завдання:

дослідження основних методів аналізу вхідної мови, що застосовуються при обробці ПОМ;

– розробка програмного забезпечення (ПЗ) для обробки вхідних LL граматик;

– реалізація генерації коду синтаксичного аналізатору вхідних ПОМ та відображення дерев граматичного розбору.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Реалізація засобів генерації аналізаторів потребує створення ПЗ для обробки граматик. ПОМ відносяться до класу формальних мов, отже, їх можна описати за допомогою формальних граматик. Формальні граматик – це четвірка $G = \{ N, T, P, S \}$, де N – алфавіт нетермінальних символів, нетерміналів; T – алфавіт термінальних символів, терміналів; P – скінченна множина визначення не термінальних символів (продукцій, породжень); S – нетермінальний символ з якого починається опис граматик [10 с. 258].

Визначну роль в розробці ПОМ грає саме множина P , що фактично містить опис синтаксису мови та в певній мірі представляє собою модель досліджуваної предметної сфери. Перед розробкою аналізаторів ця множина має бути представлена у формалізованому вигляді, наприклад, у вигляді форми Бекуса-Наура (БНФ) [9 с. 76]. Наявність опису засобами БНФ при створенні ПОМ дає змогу:

– залучити до створення мови фахівців предметної галузі без поглибленого знання інформаційних технологій;

– вдосконалювати ПОМ, шляхом додавання нових мовних конструкцій;

– виправити неоднозначності граматик;

– застосувати автоматизовані генератори для скорочення часу необхідного на розробку аналізаторів.

БНФ дозволяє чітко виділити множини N, T, P та стартовий символ S . Наприклад, частину синтаксису мови реляційної алгебри (РА), що падає під визначення ПОМ, можна представити в такому вигляді:

$\langle \text{оператор вибору таблиці} \rangle ::= \langle \text{атрибут} \rangle | \langle \text{вираз} \rangle | \langle \text{вираз} \rangle \langle \text{умовний оператор} \rangle$
 $\langle \text{вираз} \rangle ::= \langle \text{атрибут} \rangle \langle \text{оператор} \rangle \langle \text{атрибут} \rangle$
 $\langle \text{атрибут} \rangle ::= \text{id} | (\langle \text{оператор вибору таблиці} \rangle)$
 $\langle \text{умовний оператор} \rangle ::= \text{WHERE} \langle \text{перелік умов} \rangle$
 $\langle \text{перелік умов} \rangle ::= \langle \text{умова} \rangle \langle \text{логічний вираз} \rangle$
 $\langle \text{логічний вираз} \rangle ::= \langle \text{логічний оператор} \rangle$
 $\langle \text{умова} \rangle \langle \text{логічний вираз} \rangle | \varepsilon$
 $\langle \text{умова} \rangle ::= \text{id} \langle \text{оператор порівняння} \rangle \langle \text{дані} \rangle$
 $\langle \text{дані} \rangle ::= \text{число} | \text{“рядок”}$;
 $\langle \text{оператор} \rangle ::= \text{UNION} | \text{JOIN} | \text{SEMIJOIN} | \text{SEMIMINUS} | \text{INTERSECT} | \text{MINUS}$
 $\langle \text{логічний оператор} \rangle = \text{OR} | \text{XOR} | \text{AND}$
 $\langle \text{оператор порівняння} \rangle = < | > | !=$

де, всі нетермінали записуються в куткових дужках, символ S записується першим, термінали записані у вигляді токенів: **id** – ідентифікатор, **число**, **атрибут**, **рядок** – токени виділені на етапі лексичного аналізу, а весь запис є граматиною P .

Запис граматики у вигляді БНФ є корисним та важливим етапом процесу розробки трансляторів, але не може бути використаний для генерації аналізаторів сучасними інструментами. Втім перетворивши БНФ в РБНФ з додаванням у якості токенів регулярних виразів генерація стає можливою, але це може ускладнити участь в процесі формування ПОМ фахівців предметних галузей. Враховуючи специфіку використання ПОМ [1, с. 23] участь в її розробці фахівців предметних галузей, що будуть її використовувати є важливою складовою. Отже, можливість використання БНФ у якості мови опису граматики для генерації ПОМ має бути врахована при розробці генератора синтаксичних аналізаторів.

Описаний синтаксис мови дає змогу почати розробляти синтаксичний аналізатор. Перевіряти правильність синтаксису та формувати дерево розбору, що обробляється семантичним аналізатором кількома розповсюдженими методами: LL (Left-to-right Leftmost derivation), LR (Left-to-right Rightmost derivation).

При реалізації предметно-орієнтованих мови найчастіше застосовують LL(1), де в дужках показано «lookahead» – кількість символів, що використовуються для визначення наступного породження. Цей метод легко реалізується за допомогою ПСА, що, в свою чергу, не потребує

використання рекурсії та побудований на явному використанні стеку породжень.

Використання стеку породжень в предиктивному синтаксичному аналізі базується на таблиці розбору, будується після визначення множин FIRST та FOLLOW за [9 с. 285], де прийнято такі умовні позначення:

- а, в – узагальнення термінального символу;
- A, B – не термінальні символи;
- T, U, V, X, Y – граматичні символи (термінали або не термінали);
- α, β – рядки граматичних символів;
- ε – пустий символ.

Першою визначається FIRST:

- 1) Якщо X – породжує термінальний символ, то $\{X\} \text{ ***** FIRST}(X)$;
- 2) Якщо існує продукція $X ::= \varepsilon$, додамо ε до $\text{FIRST}(X)$;
- 3) Якщо X – нетермінал й існує продукція $X ::= Y_1 Y_2 \dots Y_k$, то помістимо a в $\text{FIRST}(X)$, якщо для якогось i $a \text{ ***** FIRST}(Y_i)$ і ε входить в усі множини $\text{FIRST}(Y_1), \dots, \text{FIRST}(Y_{i-1})$, тобто $Y_1 \dots Y_{i-1} \rightarrow^* \varepsilon$. Якщо ε є у всіх $\text{FIRST}(Y_i), i = 1 \dots k$, то додаємо ε до $\text{FIRST}(X)$. Наприклад, усе, що перебуває в множині $\text{FIRST}(Y_1)$, є й у множині $\text{FIRST}(X)$. Якщо Y_1 не породжує ε , то більше ми нічого не додаємо до $\text{FIRST}(X)$, але якщо $Y_1 \rightarrow^* \varepsilon$, то до $\text{FIRST}(X)$ додаємо $\text{FIRST}(Y_2)$ і т.д.

Враховуючи, що генератор синтаксичних аналізаторів має опрацьовувати файл з описом синтаксису (набір породжень), то визначення FIRST має відбуватись автоматизовано (рис. 1).

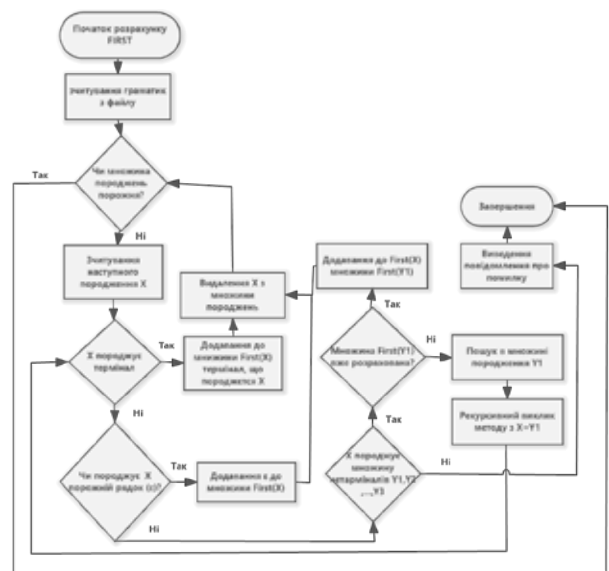


Рис. 1. Блок-схема процесу визначення множини FIRST

Множина FOLLOW(A) є множиною терміналів a , що розташовані праворуч від (після) нетерміналу

А в деякому породженні (сентенціальній формі), тобто множина терміналів a , таких, що існує породження виду, $S \rightarrow^* \alpha A \beta$ для деяких α й β .

Щоб забезпечити роботи генератора аналізаторів необхідно обрахувати FOLLOW(A) для всіх нетерміналів А програмним шляхом на основі вхідного набору породжень. Процес розрахунку FOLLOW полягає в застосування наступних правил доти, доки до жодної із множин FOLLOW не можна буде додати жодного символу [9 с. 285]:

1) поміщаємо \$ в FOLLOW(S), де S – стартовий символ, а \$ – правий обмежувач вхідного потоку;

2) якщо є продукція $A ::= \alpha B \beta$, то всі елементи множини FIRST(β), крім ϵ , поміщаються в множину FOLLOW(B);

3) якщо є продукція $A ::= \alpha B$ або $A ::= \alpha B \beta$, де FIRST(β) містить ϵ ($\beta \rightarrow^* \epsilon$), то всі елементи із множини FOLLOW(A) містяться в множину FOLLOW(B).

Генератор синтаксичних аналізаторів використовує лише набір вхідних породжень, що вимагає автоматизувати процес обчислення FOLLOW. Блок-схема алгоритму реалізації автоматичного процесу визначення цієї множини представлена на рис. 2.

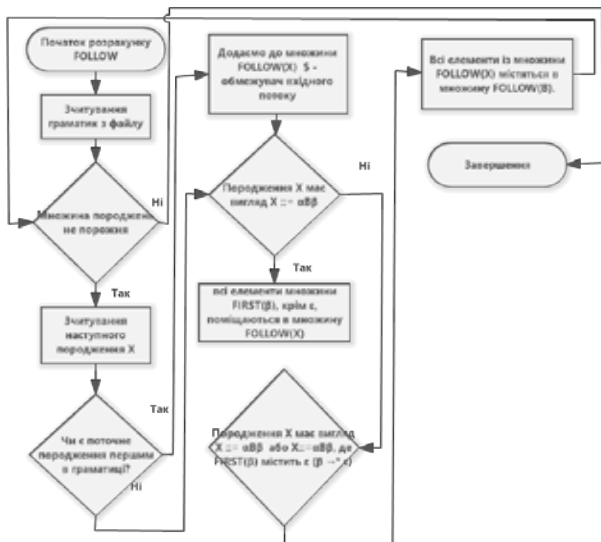


Рис. 2. Блок-схема процесу визначення множини FOLLOW

Подальша обробка LL(1) граматики вимагає наявності таблиці розбору T , що фактично є основою для роботи предикативного синтаксичного аналізатора. Генератор аналізаторів для виконання предикативного синтаксичного аналізу має автоматично будувати цю таблицю розбору. Побудова таблиці розбору здійснюється на основі множин FIRST та FOLLOW за наступним алгоритмом:

1) Для кожного породження $A ::= \alpha$ виконуємо кроки 2-4.

2) Для кожного терміналу a з $FIRST(\alpha)$ додаємо $A ::= \alpha$ в комірку $T[A, a]$.

3) Якщо в множині $FIRST(\alpha)$ входить ϵ , для кожного терміналу b з $FOLLOW(A)$ додаємо $A ::= \alpha$ в комірку $T[A, b]$.

4) Якщо в породженні $A ::= \alpha$, ϵ входить в $FIRST(\alpha)$, а \$ – в $FOLLOW(A)$, додаємо $A ::= \alpha$ в комірку $T[A, \$]$.

5) Комірки, що залишились порожніми мають містити повідомлення про помилку.

Синтаксичний аналізатор керується результатом порівняння символів на вершині стеку породжень X та поточним вхідним символом a . Два символи визначають дії синтаксичного аналізатора:

1) Якщо $X = a = \$$, робота синтаксичного аналізатору завершена без помилок.

2) Якщо $X = a \neq \$$, синтаксичний аналізатор прибирає зі стека X і зміщує покажчик вхідного потоку до наступного символу.

3) Якщо $X ::= \epsilon$, синтаксичний аналізатор прибирає зі стека X , але не зміщує покажчик вхідного потоку до наступного символу.

4) Якщо X являє собою нетермінал, відбувається аналіз породження $T[X, a]$ з таблиці розбору T . Цей запис являє собою або певне породження або запис про помилку. Якщо, наприклад, $T[X, a] = \{X ::= UTU\}$, синтаксичний аналізатор заміщує X на вершині стека на UTU (з U на вершині стека). При цьому, якщо в $T[X, a]$ немає запису про помилку, додаються елементи UTU до АСД.

5) Якщо в $T[X, a]$ повідомлення про помилку, синтаксичний аналізатор виводить користувачу повідомлення про помилку та зупиняє свою роботу.

Реалізація генератора синтаксичних аналізаторів вимагає використання мови програмування загального призначення. Мова Python підтримує велику кількість різного інструментарію, що забезпечує її універсальність. Однією з розповсюджених галузей застосування цієї мови є побудова трансляторів [2], що робить його найбільш доцільним засобом реалізації генератора синтаксичних аналізаторів.

Відображення АСД спрощує процес розробки та відлагодження семантичних аналізаторів. Серед засобів генерації аналізаторів відображення АСД реалізується тільки ANTLR і виключно за умови генерації коду для мови загального призначення Java [2]. Мова загального призначення Python підтримує можливість використання бібліотеки Graphviz.

Graphviz бібліотека з відкритим програмним кодом, що призначена для візуалізації графів

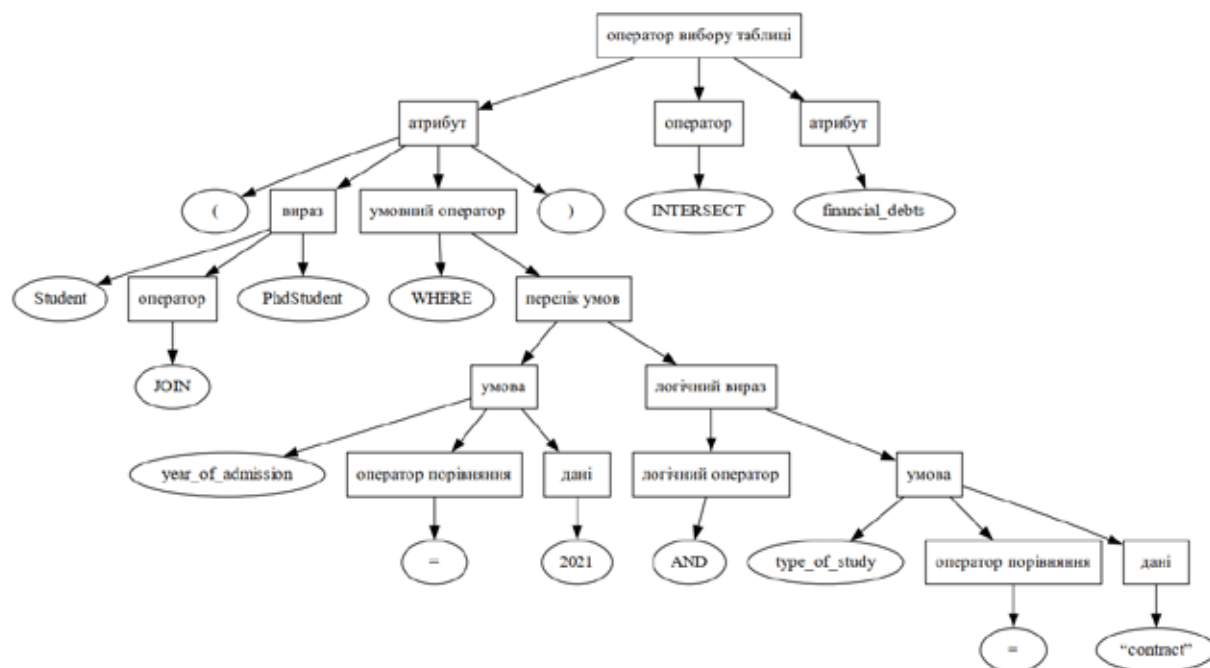


Рис. 3. Представлення АСД засобами розробленого генератора аналізаторів

[11 с. 1985]. Ця бібліотека застосовується в сучасних дослідженнях для візуалізації великих наборів даних. Зазначений факт відображає можливість відображення АСД для об'ємного коду, що дозволить значно спростити відлагодження коду семантичного аналізатора та визначити помилки в синтаксичному аналізі, що можуть виникнути помилках у вхідній множині породжень.

Вхідний рядок реляційної алгебри, що відповідає представлений вище граматиці: (Student JOIN PhdStudent WHERE year_of_admission = 2021 AND type_of_study = "contract") INTERSECT financial_debts. АСД для цього виразу матиме відносно просту структуру (рис. 3).

Особливістю розроблюваного генератора синтаксичного аналізатора ПОМ є підтримка кількох алфавітів у вхідній мові. Використання Python для реалізації зазначених вище кроків дозволяє розв'язувати цю задачу шляхом застосування вбудованих засобів. За замовчуванням Python використовує кодування utf-8. Змінити тип кодування

та збільшити кількість доступних алфавітів можливо додавши при зчитуванні з файлу параметр encoding. Для обробки вхідного коду користувача застосовані методи decode() та encode(), що в поєднанні з sys.getdefaultencoding() можуть автоматично налаштуватися на кодування операційної системи користувача та використовувати необхідний алфавіт.

Висновки. Проведено дослідження способів реалізації синтаксичного аналізатора. Запропоновано алгоритм автоматизованої генерації предикативного синтаксичного аналізатора для ПОМ. Розроблено інформаційну технологію з підтримкою кількох алфавітів в описі вхідних граматики. Застосовано інструментарій Python для відображення графових структур, що дозволяє динамічно відображати АСД. Представлено результат роботи системи.

В подальшому планується інтеграція до розробленої системи підсистеми лексичного аналізу, що дозволить повноцінно обробляти вхідний код ПОМ.

Список літератури:

1. Fowler M. Domain-Specific Languages. Boston: Addison-Wesley Professional, 2010. 640 p.
2. Фісун М. Т., Кандиба І. О., Горбань Г. В., Фаленкова М. В. Використання методу аналізу ієрархій для вибору засобів розробки синтаксичних аналізаторів при створенні DSL. Наукові праці Вінницького національного технічного університету. 2021. № 1. URL: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/issue/view/49> (дата звернення: 25.12.2022).
3. Гавриленко С. Ю., Прохорова Т. М., Давидов В. В. Дослідження методів побудови синтаксичних аналізаторів. Системи обробки інформації. 2015. Вип. 136, № 11. С. 125–127.

4. Jia X., Kumar A., Tan G. A derivative-based parser generator for visibly Pushdown grammars. Proceedings of the ACM on Programming Languages. 2021. Vol 5, №151. P. 1–24.
5. Alur R., Madhusudan P. Adding nesting structure to words. Journal of the ACM (JACM). 2009. Vol. 56, № 3. P. 1–43.
6. Scott E., Johnstone A. GLL syntax analysers for EBNF grammars. Science of Computer Programming. 2018. Vol. 166. P. 120–145.
7. ISO/IEC 14977:1996(E) Syntactic metalanguage - Extended BNF [The standard is valid from 1996-12-15]. Switzerland, Geneve. 1996. P.
8. Ortin F., Quiroga J., Rodriguez-Prieto O., Garcia M. An empirical evaluation of Lex/Yacc and ANTLR parser generation tools. Plos one. 2022. Vol. 17, № 3. P. 1-16.
9. ДСТУ ISO/IEC 25010 Інженерія систем і програмних засобів. Вимоги до якості систем і програмних засобів та її оцінювання (SQuaRE). Моделі якості системи та програмних засобів; чинний від 2018-10-10. Вид. офіц. Київ: УкрНДНЦ, 2018. 22 с.
10. Aho A., Lam M., Sethi R., Ullman J. Compilers: Principles, Techniques, and Tools. Boston: Addison Wesley, 2006. 1040 p.
11. Krommyda M., Kantere V., Vassiliou Y. Ivlg: Interactive visualization of large graphs. 2019 IEEE 35th International Conference on Data Engineering (ICDE)(2019). P. 1984–1987.

Kandyba I.O., Fisun M.T., Horban H.V., Stepanchuk D.K. GENERATOR OF MULTI-ALPHABETIC SYNTACTIC ANALYZERS WITH GRAPHICAL DISPLAY OF THE SYNTACTIC TREE

The article presents a study of the peculiarities of implementation and use of domain-specific programming languages (DSL). The basic directions of modern research in the field of parser generators are determined: implementation algorithms, increasing speed, features of integration of generated parsers. The parser generators are analyzed in the context of the development of a DSL, their main disadvantages are identified: the lack of support for several alphabets in the syntax of grammars and the lack of visualization tools for the abstract syntactic tree (AST). The features of creating an analyzer generator based on the description of grammars are described. The peculiarities of the process of designing a DSL using the Backus-Naur form (BNF) are described. A description of a part of the domain-oriented programming language of relational algebra in the form of BNF is presented. The peculiarities of the implementation of the DSL using the LL method (Left-to-right Leftmost derivation) are analyzed. The implementation of the generation of FIRST and FOLLOW sets for building a lookup table is proposed. An algorithm for constructing a lookup table based on the generated sets is given. A method of automated generation of a predicative parser is presented. The most appropriate general-purpose programming language for the implementation of a parser generator for a computer-aided design is proposed. The disadvantages of the tools for displaying the ASD in similar parsers are described. A description of the tools for visualization of the ASD obtained as a result of the generated analyzer is given. The representation of the ASD by means of the developed analyzer generator is demonstrated on the example of a relational algebra DSL query. The Python tools for working with different types of encoding and implementing support for different alphabets are analyzed. The ways of further development of the parser generator for DSL are proposed.

Key words: DSL, analyzer generator, syntax analysis, Python, Graphviz.

Кравченко О.С.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Демченко М.О.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Волошко О.В.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Філіппова М.В.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ РЕСУРСІВ ПІДПРИЄМСТВА ЗА ДОПОМОГОЮ ЦИФРОВОГО ДВІЙНИКА

У статті описано важливість ефективного використання ресурсів для успішної діяльності будь-якої компанії або організації. Проаналізовано оцінку сучасного стану проблеми для вирішення питання раціональності та доцільності використання ресурсів на підприємствах, особливо при їх плануванні. Встановлено необхідність застосування нових підходів у вирішенні ефективності використання ресурсів, які дозволяють уникнути похибок при розрахунках та необхідності виконання повторних. Запропоновано проведення аналізу ефективності використання x ресурсів на виробництві за допомогою використання технології цифрових двійників, як інноваційного підходу до моделювання та управління фізичними об'єктами. Для реалізації даного підходу, проведено експериментальне дослідження виробництва в програмному середовищі FlexSim зі створенням цифрового двійника технологічного процесу виготовлення деталі типу фланець. Даний цифровий двійник представлено у вигляді ділянки цеху з розташованим в ньому обладнанням, пристроями, операторами та зв'язками між ними, як напрями руху деталей. В ході проведення дослідження за допомогою вбудованих інструментів програмного середовища отримано дані про кожен з заданих елемент моделі. Визначено завантаження кожного елемента, що задіяний в процесі виробництва, та проаналізовано ефективність їх використання за часом роботи з урахуванням кожного з станів, в якому вони перебувають. В результаті дослідження підкреслено, що використання технології цифрового двійника на виробничих підприємствах, як інструмента для аналізу ефективності використання ресурсів, має високу результативність, та дозволяє проводити оцінку задіяння ресурсів на підприємстві за для досягнення максимального результату від працівників без втрати прибутків.

Ключові слова: автоматизація виробництва, трудові ресурси, ефективність, цифрові двійники, FlexSim.

Постановка проблеми. Ефективне використання ресурсів виробництва є невід'ємною частиною успішної діяльності будь-якої компанії або організації. Взаємозв'язок між продуктивністю працівників та прибутком компанії є очевидним. Якщо всі трудові ресурси використовуються ефективно, тоді кількість виготовленої продукції або наданих послуг збільшується, що призводить до збільшення прибутку компанії.

Однак, деякі компанії не розуміють важливості ефективного використання власних ресурсів та не

можуть його забезпечити. Управління ресурсами є ключовим елементом управління підприємством, яке дозволяє досягати високої продуктивності виробництва, зменшити витрати на закупівлю обладнання та забезпечувати максимальну продуктивність виробництва. Однак, багато компаній стикаються з проблемами управління ресурсами, які можуть призвести до неправильного розподілу ресурсів, зайвих витрат на зарплати, не досягнення максимального результату від працівників та, відповідно, до втрати прибутків.

Щоб забезпечити ефективне використання ресурсів, компанії повинні розуміти, що успішне управління ресурсами включає в себе ряд дій, таких як: аналіз продуктивності майбутнього виробництва, підбір кваліфікованих кадрів, навчання та розвиток працівників, створення комфортних умов праці, мотивацію працівників та контроль за продуктивністю роботи.

Постановка завдання. Ефективність роботи є найбільш важливою метою для кожного підприємства. Щоб досягти успіху, підприємство повинно регулярно аналізувати свою діяльність та знаходити шляхи підвищення ефективності своєї роботи в майбутньому.

Один з основних методів підвищення ефективності роботи підприємства – це проведення попереднього аналізу. Цей процес допомагає виявити недоліки та проблеми в роботі підприємства та знайти шляхи їх вирішення.

Попередній аналіз може включати в себе вивчення таких аспектів роботи підприємства, як фінансовий стан, ринкова конкуренція, здатність конкурувати з іншими підприємствами, внутрішня організація, якість продукції та інші.

Важливим етапом попереднього аналізу є визначення метрик ефективності. Це можуть бути різноманітні показники, такі як прибуток, витрати, чистий прибуток, кількість продукції, якість продукції, рівень задоволеності клієнтів та інші [4].

Після того, як метрики ефективності визначені, підприємство може перейти до оцінки своєї роботи за цими метриками. Це може включати в себе порівняння показників з аналогічними показниками інших підприємств у цій же галузі або інших ринкових галузях.

На основі отриманих результатів підприємство може знайти шляхи для підвищення своєї ефективності. Це може включати в себе зміни в організації роботи підприємства, вдосконалення процесів виробництва, покращення якості продукції, розширення асортименту, збільшення обсягів продажів, зменшення витрат на виробництво та інші заходи.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Аналіз ефективності використання ресурсів на підприємстві є важливою задачею під час планування майбутнього підприємства, тому що це напряму впливає на конкурентоспроможність підприємства і, відповідно, на те як довго підприємство буде функціонувати.

Кравченко М.А. у своїй статті [1] розкрив ефективність використання ресурсів як необхідну умовою конкурентоспроможності і прибутковості підприємств. На основі проведеного дослідження

встановлено, що для аналізу ефективності використання ресурсів потрібно застосовувати комплексний і системний підхід. Автором наголошує, що аналіз ефективності використання ресурсів, дозволяє виявити сильні і слабкі сторони управління ресурсами і запропонувати заходи щодо їх усунення чи поліпшення.

Гусарова О.С. [2] розглядає аналіз ефективності використання ресурсів на підприємстві з врахуванням аналізу чисельності, складу та руху робочої сили; аналіз використання фонду робочого часу; аналіз продуктивності праці. При цьому відмічається, що ефективність використання трудового потенціалу залежить від багатьох факторів, таких як організація праці, мотивація персоналу, соціально-психологічний клімат на підприємстві, а для оцінки ефективності використання ресурсів необхідно застосовувати комплекс показників, що характеризують кількісні і якісні аспекти працездатності персоналу.

У статті [3] автори статті розглядають проблему оптимізації розподілу ресурсів між проектами в умовах обмеженості та конфлікту ресурсів. Вони пропонують метод оптимізації на основі покращеного генетичного алгоритму, який враховує фактори, такі як навички працівників, час проекту та бюджет. У статті проводиться експериментальне порівняння їхнього методу з іншими методами оптимізації та демонструють його переваги в термінах ефективності та стабільності розподілу ресурсів. Як затверджують автори їх метод може допомогти покращити використання ресурсів підприємства та забезпечити успішне виконання проектів.

У вищеперерахованих статтях використовуються застарілі методи аналізу використання ресурсів. Вони призводять до необхідності проводити тривалі розрахунки, що досить часто веде до появи помилок в обрахунках та необхідності починати все з початку.

Постановка завдання. Ефективності використання ресурсів на підприємстві в першу чергу пов'язана з аналізом стану всіх елементів виробництва та вибору найбільш економічно вигідно підходу. Для вирішення даного питання доцільним є застосування технології цифрового двійника виробництва. Розробка цифрового двійника (ЦД) технологічного процесу виготовлення деталей, з використанням середовища розробки FlexSim, дозволить аналізувати стан всіх елементів виробництва. Метою даної роботи є використано технологію ЦД для аналізу використання ресурсів виробництва, що проектується.

Виклад основного матеріалу. Технологія ЦД, відома як Digital Twin, і є інноваційною методологією, що дозволяє створювати цифрові копії реальних об'єктів, процесів та систем. Такі цифрові моделі точно відображають реальні об'єкти та можуть бути використані для досліджень, тестування та оптимізації різних рішень та сценаріїв [5].

Однією з основних переваг використання технології ЦД є можливість моделювання та тестування різних рішень та сценаріїв, не втрачаючи часу та коштів на фізичні експерименти [6]. Завдяки цьому, компанії можуть прискорити процеси розробки та випуску нових продуктів, виробництва, планування та виконання проектів. Крім того, технологія ЦД дозволяє отримувати реальний часовий потік даних про стан реальних об'єктів та систем, що дозволяє оперативно реагувати на зміни та вчасно вносити корективи до роботи систем.

За допомогою ЦД обладнання та виробничих ліній виробництва можливо оптимізувати процес виробництва, знизити час зупинок та ремонтів обладнання, а також підвищити ефективність виробництва в цілому. Для вирішення поставленого питання, а саме аналізу ефективності використання ресурсів на підприємстві, дана технологія дозволяє визначати оптимальні рішення з точки зору ефективності та оптимізації.

Для розробки ЦД технологічного процесу виробництва серед відомих програмних середовищ такі як Siemens Digital Twin, ANSYS Twin Builder, SAP Leonardo, FlexSim, було обрано FlexSim як потужне програмне середовище для

моделювання та симуляції складних процесів та систем. Дане середовище дозволяє проектувати та оптимізувати виробничі лінії; моделювати та аналізувати складні логістичні і транспортні процеси; аналізувати ефективності бізнес-процесів та стратегій управління великими компаніями та організаціями; проектувати та тестувати нові продукти [7].

Моделювання виробництва розглянемо на прикладі технологічного процесу виготовлення типу фланець. На рис. 1 представлено план цеху по виготовленню даної деталі. Виділено основні приміщення цеху: склад заготовок, виробнича ділянка, ділянка контролю, склад деталей. Маршрут обробки складається з двох основних операцій – комплексної та шліфувальної. Для їх виконання обрано оброблювальний центр DMG MORI CTX beta 1250 TC та плоскошліфувальний верстат JET JPSG-1224TD.

Виробничий процес організовано наступним чином. Зі складу заготовок через бункер поштучної подачі надходить на конвеєр, який знаходиться в центрі виробничої лінії, а саме в центрі цеху. Біля кожного верстату розташований робот-маніпулятор, що забирає заготовку з конвеєру і завантажує до верстату, а після завершення операції – повертає деталь назад на конвеєр. Після виконання механічної обробки, деталі відправляють до контрольної станції, звідки після успішної операції деталь прямує до складу. На складі розташовані 5 автоматизованих складських механізмів: один розвозить деталі по рядах, а чотири – завантажують деталі на стелажі.

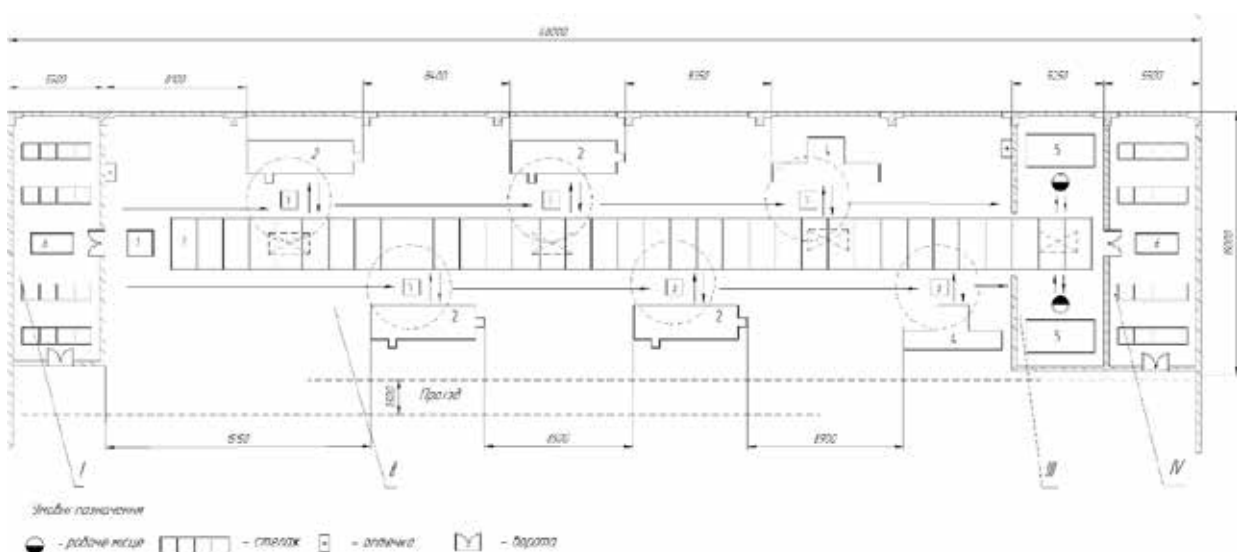


Рис. 1. План цеху по виготовленню деталі типу фланець:

I – склад заготовок, II – виробнича ділянка, III – ділянка контролю, IV – склад деталей, 1 – бункер орієнтуючої подачі, 2 – оброблювальний центр, 3 – промисловий робот, 4 – шліфувальний станок, 5 – контрольний стіл, 6 – візок, 7 – конвеєр

З огляду принципу побудови, планування цеху виглядає логічним і всі його елементи є доречними. Проте потрібно отримати якісні дані для точного аналізу даного цеху. Тому для цього створено його цифрову версію у програмному середовищі FlexSim.

На рис. 2 представлено цифрову копію виробництва створену у FlexSim. На рисунку можна побачити всі елементи цеху, а також зв'язки між елементами (чорні тонькі лінії), які задають напрям руху деталей.

За допомогою вбудованих інструментів в програмному середовищі зібрані дані про всі стани в яких знаходиться кожен елемент моделі протягом усього часу виготовлення. Проте перед тим як перейти до їх аналізу, потрібно визначити, що означає легенда кожної діаграми. У таблиці 1 приведені всі стани, які можуть зустрітися в легенді.

На рис. 3 а) зображено діаграми станів усіх виробничих станцій, таких як оброблювальні центри, плоскошліфувальні верстати та станції перевірки. На рис. 3 б) – діаграми станів усіх роботів маніпуляторів та операторів.

З рис. 3 а) видно що оброблювальні центри знаходяться в процесі обробки близько 98% всього часу, коли на решту, а саме 2%, припадає стан очікування на завантаження деталі. Виходячи з цих даних можна зробити висновок, що верстат працює ефективно.

Для даного технологічного процесу час шліфування та час потрібний на перевірку однаковий, тому проаналізувати їх можна разом. Близько 56% всього часу вони перебувають у стані роботи. Даний показник (Processing) не такий високий, як у попередніх верстатів, але зменшити кількість шліфувальних верстатів/станцій перевірки

Таблиця 1

Пояснення легенди діаграми

№	Легенда	Пояснення
1	Processing	Стан, в якому об'єкт знаходиться в процесі обробки
2	Idle	Стан, в якому об'єкт не зайнятий і не виконує жодних дій
3	Blocked	Стан, в якому об'єкт зупинився і не може продовжити виконувати свої дії через якусь причину.
4	Waiting for transporter	Стан, в якому об'єкт очікує на транспорт, який буде переносити його до нової локації.
5	Travel empty	Стан, в якому об'єкт пересувається до своєї наступної локації порожнім
6	Travel loaded	Стан, в якому об'єкт пересувається до своєї наступної локації з вантажем
7	Offset travel empty	Стан, в якому об'єкт пересувається до своєї наступної локації порожнім, але з певним затримкою на початку руху
8	Offset travel loaded	Стан, в якому об'єкт пересувається до своєї наступної локації з вантажем, але з певним затримкою на початку руху.
9	Loading	Стан, в якому об'єкт набирає вантаж
10	Unloading	Стан, в якому об'єкт розгружується.

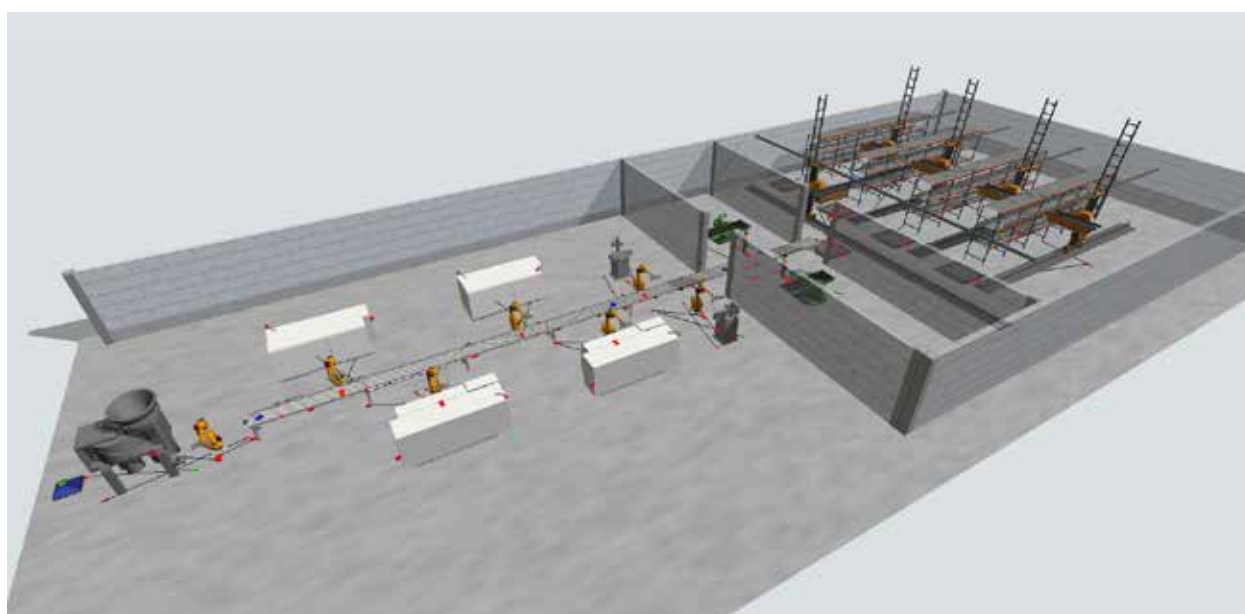


Рис. 2. Цифровий двійник виготовлення деталі типу фланець

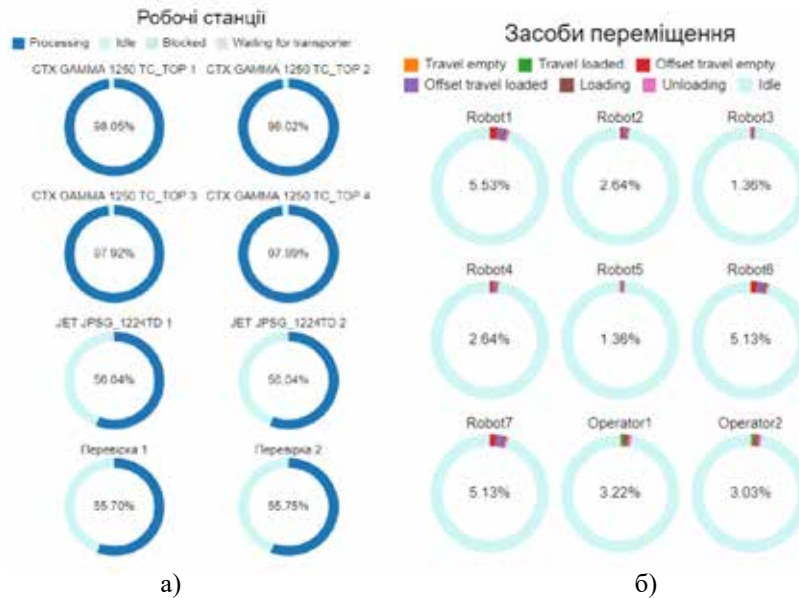


Рис. 3. Діаграми станів ЦД технологічного процесу: а) виробничі станції; б) засоби переміщення

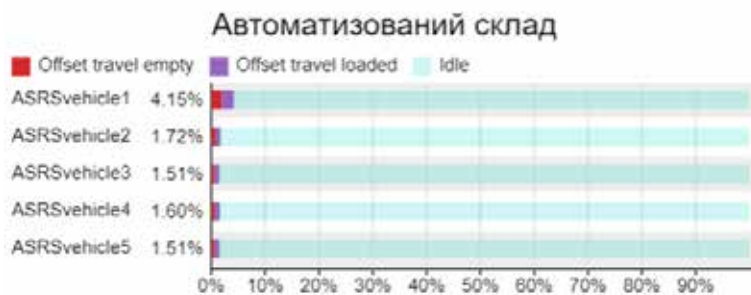


Рис. 4. Діаграми станів автоматизованих складських систем

не можна, тому що коли залишиться один верстат/станція перевірки, то на них припадатиме близько 112% часу роботи, а це означає що на виробничій лінії буде створюватися затримка.

На рис. 3 б) зображено діаграми станів маніпуляторів та операторів. Robot 1 відповідає за переміщення заготовок від пристрою поштучної подачі заготовок на конвеєр. Він знаходиться всього 5,46% всього часу в роботі, але так як він один виконує цю задачу, покращити цей вузол не має можливості, чого не можна скажати про Robot 2-5. Вони працюють близько 2% всього часу і виконують однакову задачу – завантажують заготовки в оброблювальний центр, тому їх кількість можна зменшити. В теорії можна використовувати один маніпулятор, який може переміщатися по прямій. Тільки для цього потрібно перемістити всі оброблювальні центри на одну сторону, або встановити такий маніпулятор замість деякої частини конвеєра.

З Robot 6-7 та операторами 1-2 ситуація така сама, вони знаходяться в роботі близько 5% та 3%

всього часу, відповідно. Їхню кількість можна скоротити.

На рис. 4 зображено діаграму станів складських механізмів. З діаграми видно, що перший механізм працює всього 4,15% часу, а решта – близько 1,5%. Зрозуміло, що ці ресурси використовуються не раціонально. При зміні планування цеху із цією задачею спокійно справлявся б всього один механізм, і він би знаходився у роботі близько 11% від всього часу.

З отриманих даних можна зробити висновок, що всі робочі станції працюють ефективно, чого не можна сказати про роботів-маніпуляторів, операторів та автоматизовані складські системи. З семи маніпуляторів можна залишити всього три, з двох операторів – одного, з п'яти складських механізмів – один. Проте для цього потрібно перебудувати план цеху, що значно скоротить витрати на закупівлю обладнання, і в свою чергу позитивно вплине на конкурентоспроможність фірми.

Висновок. Проведене експериментальне дослідження в програмному середовищі FlexSim з розробкою цифрового двійника цеху по виготовленню деталі типу фланець, полягало в аналізі ефективності використання ресурсів підприємства. За допомогою вбудованих інструментів отримано дані про роботу усіх елементів моделі, таких як верстати, оператори, засоби переміщення тощо.

Проведені моделювання параметрів верстатів та обладнання підтвердили доцільність вико-

ристання технології ЦД для дослідженні аналізу використання ресурсів.

Моделювання виробництва з використанням цифрового двійника дає можливість створити циф-

рову копію виробництва, виявити її недоліки та знайти шляхи їх вирішення. Отримані таким чином дані про роботу всіх елементів, дозволяють спрогнозувати їх працездатність та ефективність роботи.

Список літератури:

1. Кравченко М. А. Аналіз ефективності використання трудових ресурсів на підприємстві. Ефективна економіка, № 10, 2010. 2 с.
2. Гусарова О.С. Аналіз ефективності використання трудових ресурсів на підприємстві. Харківський Національний Економічний Університет, 2013. 1 с.
3. Liang G., Long L., Chen L. Optimization of Enterprise Labor Resource Allocation Based on Quality Optimization Model. Publishing Open Access research journals & papers, 2021. pp. 2-6.
4. Шевчук І.В., Коцеруба Н.В. Аналіз ефективності використання трудових ресурсів підприємства. Львівський науковий форум «Теорія і практика сучасної науки та освіти», 2020. 16-17 с.
5. Shcheglov V. Методи та технології розроблення цифрових двійників для гарантоздатних систем індустриального інтернету речей. Збірник наукових праць. – Полтава: ПНТУ, 2022. – Т. 4 (70). – С. 127-137. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2022.4.127>.
6. Як технології дозволяють керувати речами на відстані [Електронний ресурс]. Режим доступу – <https://techno.nv.ua/>
7. Велика О.Т., Ляковська С.Є., Смотров О.О., Бойко М.В. Імітаційне моделювання технологічного процесу виготовлення виробів у середовищі FlexSim. Scientific Bulletin of UNFU, №31, 2021. 108-113с. DOI: <https://doi.org/10.36930/40310218>.
8. Вислоух С. П., Філіппова М. В. Інформаційні основи проектування технології механоскладальних робіт в приладобудуванні. Вісник НТУУ «КПІ». Приладобудування : збірник наукових праць. 2004. № 28. С. 139–144.

Kravchenko O.S., Demchenko M.O., Voloshko O.V., Filippova M.V.

ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF USING RESOURCES IN THE COMPANY USING DIGITAL TWIN

The article discusses the importance of effective utilization of resources for the successful operation of any company or organization. An assessment of the current state of the problem is analyzed to address the issue of rational and appropriate use of resources in enterprises, particularly during their planning. The necessity of implementing new approaches in addressing resource efficiency is established, which can prevent errors in calculations and the need for repetitions. Conducting an analysis of resource utilization efficiency in production using the technology of digital twins is proposed as an innovative approach to modeling and managing physical objects. To implement this approach, an experimental study of production in the FlexSim software environment was conducted with the creation of a digital twin of the manufacturing process of a flange-type part. This digital twin is represented as a shop floor with equipment, devices, operators, and connections between them, such as directions of part movement. During the study, data were obtained for each of the specified model elements using the built-in tools of the software environment. The loading of each element involved in the production process was determined, and the efficiency of their utilization was analyzed over time with consideration of each of their states. The study emphasizes that the use of digital twin technology in manufacturing enterprises as a tool for analyzing resource efficiency is highly effective and enables the assessment of resource utilization at the enterprise to achieve maximum results from employees without loss of profits.

Key words: production automation, resources, efficiency, digital twins, FlexSim.

Курганов І.Д.

Криворізький національний університет

ОПТИМАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ ПРИВОДНИМ БАРАБАНОМ СТРІЧКОВОГО КОНВЕЄРА В АВТОМАТИЧНИХ СИСТЕМАХ З РОЗПОДІЛЕНИМИ ПАРАМЕТРАМИ ВИКОРИСТОВУЮЧИ ПРИНЦИПИ РУХЛИВОГО КЕРУВАННЯ

Запропоновано оптимальне керування приводним барабаном стрічкового конвеєра у транспортному потоці завдяки зміни натягу стрічки з метою зниження витрат на транспортування вантажу за допомогою збільшення терміну експлуатації стрічки і зниження витрат на енергоспоживання.

Пропонується для усунення аварійного пробуксовування стрічки на барабані та її надмірного стирання в процесі транспортування рудної маси застосовувати керування натягом стрічки. Для реалізації методу керування, що розробляється, необхідно використовувати математичну модель з розподіленими параметрами, на основі якої і буде сформована модель оптимального керування.

Керування такого роду об'єктами обумовлюється технологічною необхідністю компенсації ковзання стрічки на приводному барабані конвеєра, в основі якого лежить процес передачі руху за допомогою тертя, і реалізується шляхом зміни теплового поля на дузі обхвату за допомогою зміни натягу стрічки конвеєра або швидкості обертання барабана.

Таким чином, з точки зору теорії керування системами з розподіленими параметрами в процесі керування тепловим полем приводного барабана та стрічки конвеєра, як керована координата виступає температура та її розподіл на дузі обхвату.

Внаслідок фізичних процесів під час керування натягом стрічки змінюється як величина джерела теплового потоку, так і величина поверхні його випромінювання.

Таким чином, задача оптимального керування набуває нового характеру і переходить у задачу рухомого оптимального керування, де джерело теплового потоку а також його розподіл, розглядається як рухомий елемент, що змінює своє положення в процесі керування.

Ключові слова: *стрічковий конвеєр, фрикційна пара, кут робочого ковзання, теплове поле, оптимальне керування.*

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Однією з аварійних ситуацій, яка найбільш часто зустрічаються, що призводить до зупинки конвеєрної лінії, є пробуксовування приводної станції одного з стрічкових конвеєрів тракту подачі транспортованої рудної маси. В результаті доводиться зупинити весь конвеєрний тракт і здійснювати повторний пуск, але вже завантажених конвеєрів, що може призвести до пробуксовування фрикційної передачі стрічкових конвеєрів. У технологічній експлуатації стрічкових конвеєрів часто виникають ситуації, коли натяг конвеєрної стрічки ослаблений, що викликає збільшення опору руху стрічки. В результаті підвищуються витрати потужності, що споживається, приводною станцією конвеєра і знижується к.к.д. фрикційної пари барабан-стрічка, що збільшує стирання робочих поверхонь стрічки та футерування барабана, а в результаті їх тертя-нагрів.

Аналіз досліджень та публікацій. Дослідженням даної проблеми займалися автори робіт

[1, с. 5; 3, с. 115; 5, с. 200], які моделювали теплові процеси в зоні контакту стрічки та барабана та проводили експериментальні дослідження, що підтверджують результати моделювання та необхідність застосування заходів щодо усунення причин.

Так в роботі, що виконана В.С. Волотковським, отримані такі результати. На стрічкових конвеєрах великої довжини від 467 до 1870 м, площа зірваної нижньої обкладки змінюється від 15 до 25%, що викликано виникненням пробуксовування стрічки та великими значеннями напруги в нижній обкладці стрічки при її взаємодії з приводним барабаном.

У разі пробуксовування температура у зоні зчеплення стрічки та барабана зростає до 300-350°C за 15 хвилин роботи конвеєра [5, с. 200]. У своїх роботах В.Г. Пілецький виконав моделювання фрикційної пари та досліджував теплові режими приводного барабана при пробуксовуванні стрічки на ньому для різної швидкості її руху та вплив кута обхвату барабана стрічкою на швидкість зростання температури нагрівання.

У роботі [3, с. 115] автори М.О. Малютін, Л.І. Попов виконали математичне моделювання фрикційної пари з урахуванням рівняння теплопровідності Фур'є. Експериментальні дослідження температури тертя в контактній стрічка-барабан, проводилися на конвеєрах комбінату «Апатит», методом термопар із записом на осцилографі. Тут результати показали, що температура у зоні контакту тертя за зміну (5 годин безперервної роботи) зростає від 79.5 до 127°C.

Постановка задачі. Автором роботи пропонується виконати цифрове моделювання фрикційної пари як моделі з розподіленими параметрами для її подальшого використання у розробці оптимальної системи автоматичного управління. Оптимальне управління технологічним процесом транспортування вантажу будується на створенні оптимального режиму роботи фрикційної пари конвеєра приводний барабан-стрічка.

Виклад матеріалу та результатів. Розв'язання задачі керування фрикційною парою приводний барабан – стрічка заснована на побудові математичної моделі розподілу температури на дузі обхвату. Ця модель розглядається як елемент об'єкта керування, яким на нижньому рівні АСК ТП виступає стрічковий конвеєр. Керування такого роду об'єктами обумовлюється технологічною необхідністю компенсації ковзання стрічки на приводному барабані конвеєра. Керування конвеєром здійснюється за допомогою САК. Керуючими впливами є натяг стрічки та швидкість обертання приводного барабана, а контрольованим параметром – температура нагрівання футерування в зоні зчеплення. За основу побудови завдання керування доцільно використовувати принципи формування математичних моделей з розподіленими параметрами. Вибір такого класу систем ґрунтується на фізиці процесу взаємодії фрикційної передачі. Для визначення температури нагрівання футерування барабана, її розподілу на дузі робочого ковзання необхідне рішення крайової задачі, тобто. вирішення рівняння теплопровідності Фур'є за заданих початкових та кінцевих умов.

Величина джерела тепла, що випромінюється, залежить від кута (дуги) робочого ковзання, величина якого змінюється при зміні натягу стрічки конвеєра, тобто джерело тепла розподілено уздовж дуги і його положення і розподіл на дузі зчеплення барабана зі стрічкою конвеєра залежить від величини кута робочого ковзання. З погляду теорії завдань теплопровідності, дуга (кут) робочого ковзання є граничною областю випромінюваного теплового потоку.

Таким чином, зміна величини дуги (кута) робочого ковзання змінює питому величину теплового потоку, що випромінюється в результаті тертя, який є непрямим проявом керуючого впливу, розподіленим в просторі взаємодії стрічки і футеровки приводного барабана.

Розглянемо основні складові кута обхвату під час використання гнучкого зв'язку барабан – стрічка. Як відомо, при передачі руху за допомогою тертя кут на приводному барабані розділиться на дві його складові (див. рис. 1). Одна з них є кутом робочого ковзання $\alpha_{ск}$, де рух передається стрічці та його величина на приводному барабані визначає тягову здатність конвеєра. Друга складова є кутом відносного спокою $\alpha_{оп}$, величина якого дозволяє виключити пробуксовування стрічки на приводному барабані конвеєра.

У фізичній основі лежить процес передачі руху у вигляді тертя. Керування реалізує зміну теплового поля на дузі обхвату шляхом зміни натягу стрічки конвеєра або швидкості обертання барабана.

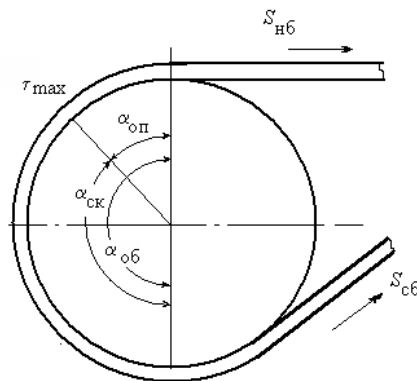


Рис. 1. Схема визначення тягової сили, переданої приводним барабаном стрічкового конвеєра

Вирішення цієї задачі дозволить виконати одну з основних вимог, що пред'являються до конвеєрної лінії – це виключення аварійного пробуксовування, а значить, запобігти перериванню технологічного процесу.

Проблема керування сприймається як задача оптимального керування з розподіленими параметрами.

Під математичною моделлю фрикційної пари приводний барабан-стрічка вважаємо теплове поле $\tau_i(x, y, z, t)$, де (x, y, z) – декартові координати точки на приводному барабані або $\tau_i(R, \varphi, z, t)$, де (R, φ, z) – циліндричні координати точки, t -час.

Попередньо вважаємо, що температура по ширині барабана рівномірно розподіляється. У цьому випадку завдання розглядається тільки в одній просторовій площині декартова (x, y) або циліндрична (R, φ) . Крайова задача зводиться до

класу двовимірних рівнянь теплопровідності із постійними коефіцієнтами.

Тепловий розрахунок фрикційної пари барабан-стрічка, заснований на вирішенні рівняння теплопровідності, яке описує теплообмін у системі футерування барабана – дуга робочого ковзання – стрічка конвеєра

$$\frac{d\tau_1}{dt} = \zeta \left(\frac{d^2\tau_1}{dx^2} + \frac{d^2\tau_1}{dy^2} + \frac{d^2\tau_1}{dz^2} \right),$$

$$\frac{d\tau_1}{dt} = \zeta \left(\frac{d^2\tau_1}{dR^2} + \frac{1}{R} \cdot \frac{d\tau_1}{dR} + \frac{1}{R^2} \cdot \frac{d^2\tau_1}{d\phi^2} + \frac{d^2\tau_1}{dz^2} \right),$$

де τ_1 – температура перегріву (понад температури навколишнього повітря), град; ζ – коефіцієнт теплопровідності, м²/сек.

Розглянемо детально формування крайової задачі, що включає рівняння теплопровідності, а також початкові та граничні умови.

Подібні крайові задачі раніше виконували автори [3, с. 115; 5, с. 200] при моделюванні теплових процесів взаємодії приводного барабана та стрічки.

Рівняння теплопровідності є параболічним рівнянням, що характеризує нестационарні процеси температурного розподілу.

$$\frac{d\tau_1}{dt} = \zeta \left(\frac{d^2\tau_1}{dR^2} + \frac{1}{R} \cdot \frac{d\tau_1}{dR} + \frac{1}{R^2} \cdot \frac{d^2\tau_1}{d\phi^2} + \frac{d^2\tau_1}{dz^2} \right) + q(t)$$

$t > 0; R1 \leq R \leq R2; 0 \leq \phi \leq 2\pi,$ (1)

$$\frac{d\tau_2}{dt} = \zeta \left(\frac{d^2\tau_2}{dR^2} + \frac{1}{R} \cdot \frac{d\tau_2}{dR} + \frac{1}{R^2} \cdot \frac{d^2\tau_2}{d\phi^2} + \frac{d^2\tau_2}{dz^2} \right) + q(t)$$

$t > 0; R2 \leq R \leq R3; 0 \leq \phi \leq \pi,$

де τ_2 – температура стрічки, град; $R1, R2$ – внутрішній та зовнішній радіуси барабана, включаючи футерування, м; $R3$ – зовнішній радіус стрічки огинаючої барабан, м (див. рис. 2); $q(t)$ – джерело теплового потоку, Дж.

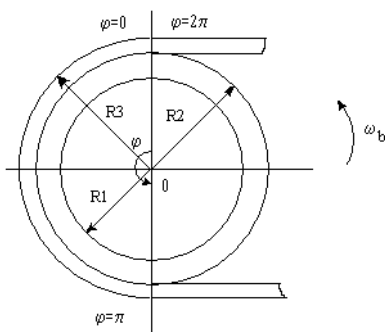


Рис. 2. Фрикційна пара барабан-стрічка конвеєра

У якості початкових умов задаємо температурний розподіл у початковий момент часу

$$\tau_1(R, \phi, 0) = \tau_{10}. \quad (2)$$

Граничні умови – умови III-го роду, для опису процесів теплообміну футеровки барабана та стрічки конвеєра, а також теплообміну стрічки з навколишнім середовищем. При цьому не враховуємо теплообмін з навколишнім середовищем торцевих поверхонь стрічки та барабана, а також внутрішньої поверхні барабана та зовнішньої поверхні стрічки. Розглянуті тіла вважаємо однорідними ізотропними з постійними теплофізичними характеристиками. Вважаємо, що температура по ширині барабана розподіляється рівномірно, у цьому випадку завдання розглядається тільки в одній просторовій площині, циліндричній (R, ϕ).

Граничні умови представлені у вигляді:

$$\lambda \cdot \frac{\partial \tau_1}{\partial R} \Big|_{R=R1} = \alpha_2 \cdot [\tau_1(R1, \phi, t) - t_0], \quad 0 \leq \phi \leq 2\pi \quad (3)$$

$$\lambda \cdot \frac{\partial \tau_2}{\partial R} \Big|_{R=R2} = \alpha_1 \cdot [\tau_1(R2, \phi, t) - t_0], \quad 0 \leq \phi \leq \pi \quad (4)$$

$$\lambda \cdot \frac{\partial \tau_2}{\partial R} \Big|_{R=R3} = \alpha_2 \cdot [\tau_2(R3, \phi, t) - t_0], \quad 0 \leq \phi \leq 2\pi \quad (5)$$

$$\lambda \cdot \frac{\partial \tau_1}{\partial R} \Big|_{R=R2} = \alpha_2 \cdot [\tau_1(R2, \phi, t) - t_0], \quad \pi \leq \phi \leq 2\pi \quad (6)$$

$$\tau_1(R, \phi, t) = \tau_1(R, \phi + 2\pi n, t) \quad (7)$$

$$\frac{\partial \tau_1}{\partial \phi} \Big|_{\phi=\phi} = \frac{\partial \tau_1}{\partial \phi} \Big|_{\phi=\phi+2\pi n}, \quad n=0, 1, 2, \dots, \quad (8)$$

$$\frac{\partial \tau_2}{\partial \phi} \Big|_{\phi=0} = \frac{\partial \tau_2}{\partial \phi} \Big|_{\phi=\pi} = 0$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу барабана та стрічки, Вт/м•град; α_1 – коефіцієнт теплообміну між поверхнями барабана і стрічки, Вт/м²•град; α_2 – коефіцієнт теплообміну з повітрям зовнішньої поверхні барабана, Вт/м²•град [5 с. 202].

Коефіцієнти ζ і λ пов'язані співвідношенням $\zeta = \lambda / c \cdot \rho$, де ρ – щільність тіла, що нагрівається, кг/м³; c – теплоємність, Дж/кг•град.

Таким чином, представлена математична модель фрикційної пари приводний барабан – стрічка є крайовою задачею в основі, якою лежить рішення рівняння теплопровідності, технологічної системи, що розглядається, і є складовою задачею оптимального керування.

Як подальший розвиток ідеї керування фрикційною парою приводний барабан – стрічка виступають принципи рухомого керування, що застосовуються в системах з розподіленими параметрами. Розглянемо детальніше.

Система автоматичного керування з розподіленими параметрами, що розробляється, зводиться не тільки до задачі оптимального керування, а має

ширший розгляд. Це пов'язано з тим, що внаслідок фізичних процесів під час керування натягом стрічки змінюється як величина джерела теплового потоку (q), так і величина поверхні, де відбувається його випромінювання ($\alpha_{\text{ск}}$).

Таким чином, завдання оптимального керування набуває нового характеру і переходить у задачу рухомого оптимального керування, де джерело теплового потоку а також його розподіл, розглядається як рухомий елемент, що змінює своє положення в процесі керування. Відповідно, закон або алгоритм руху джерела називатимемо рухомих керуючим впливом або рухомих керуванням.

Розглянемо математичний опис задачі рухомого керування.

Класичне (нерухоме) керування, взагалі кажучи, векторне $q(x, y, t)$ замінюється при цьому на

$$q[x, y, t, x - \phi(t), y - \phi(t)],$$

де $\phi(t)$ – місце розташування джерела, що змінюється ($\phi(t) = v(t)$, $v(t)$ – швидкість), і постає тепер як окремий випадок більш загального впливу. Тут x, y і ϕ також, взагалі кажучи, вектори [2 с. 35].

Можна розглянути й інше формулювання завдання керування. Наприклад, нехай D – просторова область визначення керуючих впливів деякої розподіленої системи. Рухоме керування даного розподіленого об'єкта характеризуватимемо функцією $v(x, y, t)$, $x \in D, y \in D, t \geq t_0$, яка представляється у вигляді

$$v(x, y, t) = u(x, y, t) \cdot \mu(x, y, t),$$

де $u(x, y, t)$ – інтенсивність рухомого управління, а $\mu(x, y, t)$ – міра, що характеризує просторово-часову локалізацію, причому

$$\mu(x, y, t) \geq 0, \quad \iint_D \mu(x, y, t) dx dy, \quad t \geq t_0 \quad [2 \text{ с. } 35].$$

Окремим випадком такого керування є зосереджене в точці рухоме керування, причому координати точки зосередження залежать від часу. Інакше кажучи, є деяка часова програма руху зосередженого джерела $\phi(t)$ у просторі, тобто $\phi(t)$ – параметрично (параметр – час) задана траєкторія, що належить області D . Цьому окремому випадку точці локалізації рухомого керування відповідає сингулярна міра

$$\mu(x, t) = \delta(x - \phi(t)), \quad x \in D, \quad \phi(t) \in D, \quad t \geq t_0,$$

$$\mu(y, t) = \delta(y - \phi(t)) \quad y \in D, \quad \phi(t) \in D, \quad t \geq t_0.$$

Рухоме керування у цьому випадку має вигляд $v(x, y, t) = u(x, y, t) \cdot \delta(x - \phi(t)) \cdot \delta(y - \phi(t))$ [2 с. 35].

У нашому випадку, при розгляді системи оптимального керування під областю D мається на увазі дуга обхвату приводного барабана стрічкою конвеєра. Часовою програмою руху $\phi(t)$ у просторі є зміна положення точки початку дуги робочого ковзання $\alpha_{\text{ск}}$ за зміни натягу стрічки конвеєра внаслідок керування.

Щоб розглядати задачу рухомого керування, як нерухому досить покласти

$$\phi(t) = k \text{ для усіх } t \in [t_0, t_n],$$

де k – фіксоване значення, що розглядається на часовому проміжку.

Таким чином, крайова задача [5, с. 200] буде представлена в наступному вигляді

$$\frac{d\tau_1}{dt} = \zeta \left(\frac{d^2\tau_1}{dR^2} + \frac{1}{R} \cdot \frac{d\tau_1}{dR} + \frac{1}{R^2} \cdot \frac{d^2\tau_1}{d\phi^2} + \frac{d^2\tau_1}{dz^2} \right) + q(R, \phi, z, t) \cdot \delta(\phi - \phi(t))$$

$$t > 0; R_1 \leq R \leq R_2; 0 \leq \phi \leq 2\pi$$

$$\frac{d\tau_2}{dt} = \zeta \left(\frac{d^2\tau_2}{dR^2} + \frac{1}{R} \cdot \frac{d\tau_2}{dR} + \frac{1}{R^2} \cdot \frac{d^2\tau_2}{d\phi^2} + \frac{d^2\tau_2}{dz^2} \right) + q(R, \phi, z, t) \cdot \delta(\phi - \phi(t))$$

$$t > 0; R_2 \leq R \leq R_2; 0 \leq \phi \leq \pi$$

задача оптимального керування формується на основі функціоналу, який дозволить виконати оптимальне керування розподілом температури на дузі обхвату приводного барабана в часовій області. Значення температурного розподілу визначається для кількох точок досліджуваного простору дуги обхвату. Функціонал представлений таким виразом

$$J = \int_0^T [\tau_1^*(x, y, z) - \tau_1(x, y, z, t)]^2 dt \rightarrow \delta.$$

В результаті задача рухомого керування може бути сформульована в такий спосіб. З усіх можливих алгоритмів керування q вказати такий, за якого функціонал J задовольнив умову $J \rightarrow \delta$ (де δ – деяке позитивне число, що характеризує точність наближення до бажаного розподілу) за мінімально можливий час T .

Висновки та напрямок подальших досліджень. Таким чином, фрикційна пара приводу конвеєра включає досить складне завдання дослідження фізичних процесів. Вирішення цієї задачі дає результати визначення режимів роботи приводного барабана. При внесенні до неї додаткового закону керування, ця задача розгортається в задачу оптимального керування, а за зміною її граничних умов реалізуються закони рухомого керування.

Список літератури:

1. Андреев А.В. Передача трением. Москва, 1963. 109 с.
2. Бутковский А.Г., Пустыльников Л.М. Теория подвижного управления системами с распределенными параметрами. Москва, 1980. 384 с.

3. Малютин М.А., Попов Л.И. Исследование контактной температуры в приводах ленточных конвейеров. *Известия Вузов. Горный журнал*. 1972. № 2. С. 115-119.

4. Рапопорт Э.Я Структурное моделирование объектов и систем управления с распределенными параметрами. Москва, 2003. 299 с.

5. Трощило В.С., Пилецкий В.Г. Исследование нагрева ленты конвейера при пробуксовке приводного барабана. *Гірнич електромеханіка та автоматика*. 1999. № 2(61). С. 200-204.

Kurganov I.D. OPTIMAL CONTROL OF THE DRIVE DRUM OF THE BELT CONVEYOR IN AUTOMATIC SYSTEMS WITH DISTRIBUTED PARAMETERS USING THE PRINCIPLES OF MOBIL CONTROL

Optimum control of the drive drum of the belt conveyor in the transport flow due to the change in belt tension is proposed in order to reduce the cost of transporting goods by increasing the life of the belt and reducing energy consumption costs.

It is suggested to use tape tension control to eliminate the accidental slipping of the tape on the drum and its excessive abrasion during the transportation of the ore mass. To implement the control method being developed, it is necessary to use a mathematical model with distributed parameters, on the basis of which the optimal control model will be formed.

Control of this kind of objects is determined by the technological need to compensate for the slippage of the belt on the drive drum of the conveyor, which is based on the process of transmission of motion using friction, and is implemented by changing the thermal field on the arc of the girth by changing the tension of the conveyor belt or the speed of rotation of the drum.

Thus, from the point of view of the theory of control of systems with distributed parameters, in the process of controlling the thermal field of the drive drum and the conveyor belt, the controlled coordinate is the temperature and its distribution on the girth arc.

As a result of physical processes, both the size of the source of the heat flux and the size of the surface of its radiation change during the control of the tape tension.

Thus, the task of optimal control acquires a new character and turns into a task of moving optimal control, where the source of the heat flow and its distribution are considered as a moving element that changes its position during the control process.

Key words: belt conveyor; a frictional couple, operating slip angle, thermal field, optimum control.

Лісовець С.М.

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

Ківа І.Л.

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

Гуйда О.Г.

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

Вишемірська Я.С.

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

ОРГАНІЗАЦІЯ ДОСТУПУ ДО ДАНИХ В SCADA-СИСТЕМАХ ЗА ДОПОМОГОЮ MICROSOFT SQL SERVER

Сучасні системи керування різними технологічними об'єктами, операціями і процесами, особливо достатньо складними, практично завжди потребують зовнішнього контролю. Для здійснення такого контролю є прекрасно працюючий «механізм» у вигляді SCADA-систем. Але у деяких випадках, коли використовується незначна кількість технологічних параметрів та один-два різні інтерфейси / протоколи, існуючі SCADA-системи відомих виробників можуть бути надлишковими, так як не всі їх можливості можуть бути потрібні. Як один з варіантів створення власних SCADA-систем (під задачі певного невеликого виробництва) є використання мови програмування С#. Перевагою такого підходу є те, що в результаті можна отримати SCADA-систему саме під свої виробничі задачі. Однією з функцій SCADA-систем є робота з даними, які отримуються під час виробництва (вхідні сигнали від датчиків, вихідні сигнали на виконавчі механізми і регулюючі органи, сигнали про порушення режимів роботи тощо). Такі дані постійно змінюються, часто їх необхідно надійно зберігати і мати можливість отримати до них доступ в будь-який момент часу. В проведеному дослідженні було показано, що для доступу до даних в процесі виробництва зі SCADA-системи можна використати Microsoft SQL Server в якості сервера SQL-баз даних, а також код невеликого розміру на мові програмування С#, який дозволяє виконувати потрібні команди Transact-SQL. Перевага такого доступу полягає в тому, що С#, як сучасна мова програмування з багатьма можливостями, має вбудовані засоби доступу до SQL-баз даних, і основною задачею розробника в такому випадку є їх ефективно використання. До таких засобів відносяться, зокрема, вбудовані в С# класи SqlConnectionStringBuilder, SqlConnection, SqlCommand і деякі інші. Вони дозволяють, використовуючи методи ExecuteNonQuery(), ExecuteScalar() і/або ExecuteReader(), виконати практично будь-яку команду Transact-SQL.

Ключові слова: база даних, клас, об'єкт керування, промислова автоматизація, результуючий набір, технологічний параметр.

Постановка проблеми. SCADA-системи (абр. від англ. Supervisory Control and Data Acquisition, оперативне керування і збір даних) – це пакети програм, які призначені для розробки і/або забезпечення роботи систем збору, обробки, відображення і архівування даних про об'єкт керування (об'єкт автоматизації) [1]. Вони є частиною систем промислової автоматизації та можуть використовуватися практично в усіх галузях промисловості. SCADA-системи можуть бути як самостійними системами, так і входити до складу інших систем (автоматизованих систем керування технологічними процесами/підприємствами, систем авто-

матизації будівель «розумний дім», систем моніторингу екологічного стану довкілля і так далі). Одним з «недоліків» SCADA-систем, які пропонують різні відомі виробники, є їхня надлишковість – для взаємодії з об'єктом керування не потрібні всі можливості, які такі системи мають (відповідно, вартість таких систем часто є дуже високою). Тому при невеликій складності об'єкта керування іноді доцільно SCADA-системи розробляти самостійно. Одна з необхідних складових таких SCADA-систем – база даних, в якій можуть зберігатися дані про, наприклад, різні технологічні параметри. До систем керування

такими базами даних висуваються кілька вимог. По-перше, часто необхідно в «реальному часі» мати доступ до значень кількох десятків і сотень технологічних параметрів; по друге, необхідно забезпечити високу надійність збереження таких даних. Такими системами можуть бути системи, які використовують мову структурованих запитів Structured Query Language (SQL).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. SQL-бази даних є надійним засобом для зберігання даних різного призначення і розміру, які можуть бути представлені в різних форматах [2]. Для доступу до таких SQL-баз використовуються системи керування базами даних різних розробників, найбільш відомими з яких є IBM DB2, Microsoft SQL Server, MySQL, Oracle, PostgreSQL і деякі інші. Серед них, зокрема, однією з провідних систем керування базами даних є Microsoft SQL Server.

Із Microsoft SQL Server тісно інтегрована програма Microsoft SQL Server Management Studio, яка дозволяє швидко і дуже зручно створювати бази даних, таблиці, курсори, функції і інші елементи баз даних. Але для доступу до баз даних зі сторони клієнтів така програма не дуже підходить через неможливість створення зручного інтерфейсу з клієнтами, кожний з яких повинен вирішувати саме свої специфічні задачі.

Одним із зручних засобів для доступу до SQL-баз даних, зокрема, створених з використанням Microsoft SQL Server, є мова програмування C# [3, 4]. По-перше, вона підтримується тією ж самою Microsoft. По-друге, завдяки технології .NET можна організувати швидкий і надійний доступ до таких баз. Така швидкість і надійність досягається за рахунок того, що мова програмування C# утримує кілька вбудованих класів, призначених для роботи саме з SQL-базами даних. Зокрема, клас SqlConnectionStringBuilder дозволяє створювати рядки підключень до SQL-баз даних і керувати їх умістом, клас SqlConnection – підключитися до SQL-баз даних, клас SqlCommand – виконувати команди Transact-SQL. Задачею розробника засобів доступу до SQL-баз даних в такому випадку є коректне використання таких класів і створення відповідної графічної оболонки (для чого в C# є всі необхідні засоби програмування).

Аналіз останніх досліджень і публікацій показує, що у випадках, коли від комп'ютерної системи не вимагається досягнення максимальної швидкодії (в цьому випадку рекомендується використовувати, зокрема, мови програмування C або C++), мова програмування C# є ефективним засобом отримання програмного коду невеликого розміру.

Постановка завдання. Метою дослідження, результати якого обговорюються в статті, є показати у вигляді невеликого прикладу програмного коду на мові програмування C# як можна організувати, використовуючи наведені вище класи і додатково кілька інших класів, ефективний доступ до SQL-баз даних загального призначення. Аналогічний підхід може бути використаний, зокрема, і при розробці SCADA-систем для зберігання інформації про результати вимірювання, формування керувальних впливів, відхилення від нормальних режимів роботи тощо.

Виклад основного матеріалу дослідження. Сама SQL-база даних створювалася в Microsoft SQL Server Management Studio, а програмний код для доступу до неї – в середовищі Visual Studio 2019. Для початку роботи з SQL-базою даних необхідно отримати до неї доступ (тобто підключитися до неї). Рядок підключення до такої бази даних, в залежності від версії Microsoft SQL Server і інших чинників, може бути різним. Він представляє собою кілька виразів виду «Параметр=Значення», які відокремлені один від одного символом “;”. Звичайно використовуються параметри “Data Source” (посилання на Microsoft SQL Server), “Initial Catalog” (посилання на базу даних) і “IntegratedSecurity” (якщо для аутентифікації використовується обліковий запис Windows, то такий параметр повинен мати значення true).

Розглянемо, в якості прикладу, базу даних Electronic_Components, створену в Microsoft SQL Server Management Studio і яка вже утримує в таблиці Resistors вісім записів з інформацією про такі електронні компоненти, як резистори (див. рис. 1).

	Type_Of_Resistors	Nominal_Resistance	Nominal_Power	Number_Of_Resistors
1	МЛТ	100	0,25	20
2	МЛТ	120	0,5	90
3	МЛТ	150	1	100
4	МЛТ	180	2	50
5	МЛТ	220	0,25	120
6	МЛТ	270	0,5	110
7	МЛТ	330	1	70
8	МЛТ	390	2	10

Рис. 1. Таблиця з інформацією про резистори

Наведений нижче фрагмент коду дозволяє створити рядок підключення до такої бази даних (вже в Visual Studio 2019).

```

SqlConnectionStringBuilder _
SqlConnectionStringBuilder_ =new
SqlConnectionStringBuilder();
    _SqlConnectionStringBuilder_.DataSource =
@".\SQLEXPRESS";
    _SqlConnectionStringBuilder_.InitialCatalog =
"Electronic_Components";
    _SqlConnectionStringBuilder_.
IntegratedSecurity = true;
    
```


Після його виконання властивість `ConnectionString` екземпляра класу `_SqlConnectionStringBuilder` буде мати рядок підключення, повністю готовий до використання. Зокрема, для відкриття підключення використовується метод `Open()` класу `SqlConnection`, для закриття – метод `Close()`. Для того, щоб гарантовано закрити підключення до SQL-бази даних, рекомендується відкривати таке підключення в блоці `using` – таким чином, при виході за межі такого блоку підключення буде гарантовано закрито. Наведений нижче фрагмент коду дозволяє створити, відкрити (і в подальшому закрити) підключення до такої бази даних.

```
using (SqlConnection _SqlConnection_ = new
SqlConnection(_SqlConnectionStringBuilder_
.ConnectionString))
{
    _SqlConnection_.Open();
    // Команди Transact-SQL
}
```

Для виконання команд Transact-SQL передбачається використання класу `SqlCommand`, який дозволяє виконати за один раз тільки одну таку команду. При цьому властивість `CommandText` задає команду Transact-SQL, а властивість `Connection` – підключення до SQL-бази даних. Якщо потрібно виконання команди Transact-SQL без отримання результуючого набору (наприклад, INSERT), використовується метод `ExecuteNonQuery()` класу `SqlCommand`, з результуючим набором у вигляді скаляра (наприклад, SELECT разом з Sum) – `ExecuteScalar()`, з результуючим набором у вигляді таблиці (наприклад, SELECT) – `ExecuteReader()`.

Наприклад, виконання наведеного нижче фрагмента коду (заміщує собою рядок // Команди Transact-SQL) дозволяє додати в таблицю `Resistors` чотири записи (див. рис. 2).

```
using (SqlCommand _SqlCommand_ = new
SqlCommand())
{
    _SqlCommand_.Connection = _SqlConnection_;
    _SqlCommand_.CommandType =
CommandType.Text;
    _SqlCommand_.CommandText = "INSERT
Resistors VALUES ( N'МЛТ', 470.0, 0.25, 80) ";
    _SqlCommand_.ExecuteNonQuery();
    _SqlCommand_.CommandText = "INSERT
Resistors VALUES ( N'МЛТ', 560.0, 0.5, 30) ";
    _SqlCommand_.ExecuteNonQuery();
    _SqlCommand_.CommandText = "INSERT
Resistors VALUES ( N'МЛТ', 680.0, 1.0, 60) ";
```

```
_SqlCommand_.ExecuteNonQuery();
_SqlCommand_.CommandText = "INSERT
Resistors VALUES ( N'МЛТ', 820.0, 2.0, 40) ";
_SqlCommand_.ExecuteNonQuery();
}
```

	Type_Of_Resistors	Nominal_Resistance	Nominal_Power	Number_Of_Resistors
1	МЛТ	100	0,25	20
2	МЛТ	120	0,5	90
3	МЛТ	150	1	100
4	МЛТ	180	2	50
5	МЛТ	220	0,25	120
6	МЛТ	270	0,5	110
7	МЛТ	330	1	70
8	МЛТ	390	2	10
9	МЛТ	470	0,25	80
10	МЛТ	560	0,5	30
11	МЛТ	680	1	60
12	МЛТ	820	2	40

Рис. 2. Таблиця з доданою інформацією про чотири резистори

Виконання іншого наведеного нижче фрагмента коду дозволяє визначити загальну кількість резисторів в таблиці `Resistors`, яка дорівнює 780 (див. рис. 3).

```
using (SqlCommand _SqlCommand_ = new
SqlCommand())
{
    _SqlCommand_.Connection = _SqlConnection_;
    _SqlCommand_.CommandType =
CommandType.Text;
    _SqlCommand_.CommandText = "SELECT
SUM(Number_Of_Resistors) FROM Resistors ";
    Int32 Total_Number_Of_Resistors = (Int32)
_SqlCommand_.ExecuteScalar();

    Console.WriteLine(Convert.ToString(Total_
Number_Of_Resistors));
}
```



Рис. 3. Результат визначення загальної кількості резисторів

А виконання ще одного наведеного нижче фрагмента коду дозволяє отримати результуючий набір із записів, для яких номінальний опір резисторів більше 300 Ом (див. рис. 4).

```
using (SqlCommand _SqlCommand_ = new
SqlCommand())
{
    _SqlCommand_.Connection = _SqlConnection_;
    _SqlCommand_.CommandType =
CommandType.Text;
    _SqlCommand_.CommandText = "SELECT *
FROM Resistors WHERE Nominal_Resistance > 300 ";
```

```

using(SqlDataReader _SqlDataReader_ = _
SqlCommand_.ExecuteReader())
{
    while (_SqlDataReader_.Read())
    {
        Console.WriteLine(String.Format("{0}
{1:f0} {2:f2} {3:n0}", _SqlDataReader_[0],
_SqlDataReader_[1], _SqlDataReader_[2], _
SqlDataReader_[3]));
    }
}

```

Наведені вище фрагменти програмного коду дозволяють створювати програмний код у вигляді консольної програми. Але ті ж самі класи можна використати і при створенні, наприклад, програми Windows Forms або WPF.

Висновки. В статті показано, що, використовуючи відповідні класи мови програмування

МЛТ	330	1,00	70
МЛТ	390	2,00	10
МЛТ	470	0,25	80
МЛТ	560	0,50	30
МЛТ	680	1,00	60
МЛТ	820	2,00	40

Рис. 4. Результат визначення резисторів з номінальним опором більше 300 Ом

С#, можна достатньо легко організувати надійний доступ до SQL-баз даних, який може бути використаний при створенні власних SCADA-систем.

Список літератури:

1. Пупена О.М. Розроблення людино-машинних інтерфейсів та систем збирання даних з використанням програмних засобів SCADA/HMI: Навч. посіб. – Київ: Видавництво Ліра-К, 2020. – 594 с.
2. Гайдаржи В.І. Бази даних в інформаційних системах: Підручник / В.І. Гайдаржи, Ізварін І.В. – Київ: Видавництво Університет «Україна», 2018. – 418 с.
3. Standard ECMA-334. C# Language Specification. 5th Edition. – ECMA International. – December 2017.
4. Кравець П.О. Об'єктно-орієнтоване програмування: Навчальний посібник / П.О. Кравець. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2012. – 624 с.

Lisovets S.M., Kiva I.L., Guida O.G., Vyshemirska Ya.S. ORGANIZING ACCESS TO DATA IN SCADA SYSTEMS USING MICROSOFT SQL SERVER

Modern control systems for various technological objects, operations and processes, especially sufficiently complex ones, almost always require external control. There is a perfectly working «mechanism» in the form of SCADA systems for such control. But in some cases, when a small number of technological parameters and one or two different interfaces / protocols are used, existing SCADA systems from well-known manufacturers may be redundant, as not all their capabilities may be needed. As one of the options for creating your own SCADA systems (under the task of a certain small production) is the use of the C# programming language. The advantage of this approach is that as a result, you can get a SCADA system specifically for your production tasks. One of the functions of SCADA systems is to work with data received during production (input signals from sensors, output signals to executive mechanisms and regulatory bodies, signals about violations of operating modes, etc.). Such data is constantly changing, often it is necessary to store it securely and be able to access it at any time. In the conducted research, it was shown that to access data in the production process from the SCADA system, you can use Microsoft SQL Server as a SQL database server, as well as a small code in the C# programming language that allows you to execute the necessary Transact-SQL commands. The advantage of such access is that C#, as a modern programming language with many features, has built-in means of accessing SQL databases, and the main task of the developer in this case is to use them effectively. These tools include, in particular, the built-in C# classes SqlConnectionStringBuilder, SqlConnection, SqlCommand and some others. They allow you to execute almost any Transact-SQL command using the ExecuteNonQuery(), ExecuteScalar(), and/or ExecuteReader() methods.

Key words: database, class, control object, industrial automation, result set, technological parameter.

УДК 519.722

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.2.1/29>**Макарова Л.М.**

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Камінський С.С.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Бриггалов М.В.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ЗНАХОДЖЕННЯ ВНЕСЕНИХ ЗМІН В КОД ВИКОНУВАНИХ ФАЙЛІВ

Метою даної роботи є розробка програмного забезпечення для знаходження внесених змін в код виконуваних файлів. Відомо що, розвиток сучасних комп'ютерних технологій породжує безліч нових можливостей та оптимізації звичайних процесів. Однак в основі кожного процесу лежить передача даних і виконання коду на обчислювальній машині, що включає в себе комплексні процеси перетворення коду в машину мову. Чим більшими і складнішими стають ці системи, тим вище стають вимоги до безпеки на кожному етапі розвитку і тим більше потенційних слабкостей у них виявляється. Однією з таких вразливостей є ін'єкція коду у виконуваний файл. Ці випадки можуть призвести до величезних втрат, потенційної небезпеки втрати важливих даних та їхнього потрапляння до третіх осіб.

Досліджено різні метрики для визначення авторства коду програмного забезпечення, отже, для виявлення впровадження шкідливого коду. У статті розглянуто один із способів вирішення цієї проблеми, а саме підрахунок метрик вихідного або виконуваного програмного коду. Визначено кількісну метрику ентропію, яка добре підходить для перевірки авторства програмного коду та показано, що використовуючи дану метрику можна з високою ймовірністю стверджувати, написана нова ділянка коду розробником програми чи ні.

Результатом роботи є програмне забезпечення для знаходження внесених змін в код виконуваних файлів DisEn, побудоване на .NET Framework з використання мови програмування C#, яке дозволяє перевіряти виконуваний файл на наявність змін і допомагає користувачам визначити, чи був файл змінений автором або шкідливим програмним забезпеченням. Основними функціональними можливостями програми DisEn є: дизасемблювання виконуваних файлів для отримання асемблерного коду, обчислення значення ентропії для кожної команди, зіставлення даних із попередньою версією файлу (за наявності), аналіз отриманих даних з точки зору різниці ентропії, відображення отриманих даних у вигляді таблиць та графіків, збереження зліпків файлів за іменами для подальшого порівняння на предмет авторства змін.

Ключові слова: ентропія, дизасемблювання, виконуваний файл, зміна коду, програмний додаток.

Постановка проблеми. Наявність вірусів або інших шкідливих модифікацій у програмному коді становить серйозний ризик для безпеки комп'ютерних систем. Якщо ці зміни не виявити і не усунути, вони можуть поставити під загрозу конфіденційність, цілісність і доступність системних ресурсів. Це може призвести до катастрофічних наслідків, таких як крадіжка персональних даних, фінансове шахрайство або навіть кібератаки на інші системи [1].

Щоб запобігти таким інцидентам, дуже важливо якомога швидше виявляти та усувати вірусні зміни в програмах. Однак це завдання є доволі складним, оскільки зловмисники можуть використовувати різні методи, щоб приховати або

замаскувати свої модифікації. Як наслідок, для вирішення цієї проблеми також використовуються різні підходи, такі як аналіз коду, виявлення вторгнень, мережевий моніторинг та інші.

Аналіз коду передбачає перевірку програмного коду на наявність підозрілих паттернів, таких як використання шкідливих функцій або бібліотек. Цей підхід може бути ручним або автоматизованим і може вимагати спеціалізованих навичок та інструментів. Виявлення вторгнень передбачає моніторинг системних подій, таких як зміни файлів, мережеві з'єднання або системні виклики, для виявлення підозрілих дій, які можуть свідчити про зміну вірусом. Цей підхід може використовувати алгоритми, засновані на правилах або машинному

навчанні для виявлення аномалій і сповіщення про них [2].

Моніторинг мережі передбачає аналіз трафіку між програмою та іншими системами для виявлення зловмисних дій, таких як витік даних або командно-контрольна комунікація. Цей підхід може використовувати такі інструменти, як сніфери пакетів, системи запобігання вторгненням або брандмауери для моніторингу та блокування підозрілого трафіку [3].

Загалом, виявлення та усунення вірусних змін у програмах є критично важливим завданням у забезпеченні безпеки комп'ютерних систем. Застосовуючи різні підходи та не втрачаючи повноти, системні адміністратори можуть захистити свої системи від широкого спектру загроз і вберегти їх від шкоди.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Одним із способів виявлення авторства змін у тексті, зокрема, і комп'ютерної програми, є застосування кількісної метрики – ентропії, що добре підходить для визначення авторства програмного коду, тобто, використовуючи дану метрику, можна з високою ймовірністю стверджувати, написана нова ділянка коду автором програми чи є чужою вставкою.

Інформаційна ентропія Шеннона [4] була обрана як основа для розрахунку завдяки тому, що вона дає змогу отримувати кількісні результати, які зручно порівнювати один з одним і, тим самим, визначати авторство зміни файлу.

Елементами для розрахунку метрики виступають асемблерні команди виконуваних файлів. Тож, щоб отримати ці команди, треба спочатку дизасемблювати файл.

В першу чергу були розглянуті такі існуючі рішення для дизасемблювання, як IDA Pro Disassembler [5] та Immunity Debugger [6].

IDA Pro Disassembler [5] – інтерактивний дизасемблер, який широко використовується для реверс-інжинірингу. Він відрізняється винятковою гнучкістю, наявністю вбудованої командної мови, підтримує безліч форматів файлів для великої кількості процесорів і операційних систем.

Immunity Debugger [6] – це новий потужний спосіб написання експлойтів, аналізу шкідливих програм та аналізу бінарних файлів. Він заснований на надійному інтерфейсі користувача з графічними функціями. Розроблений спеціально для створення множин з великим і добре підтримуваним інтерфейсом Python API для легкої розширюваності.

Однак вищеназвані дизасемблери надто важкі і великі. Тому були знайдені більш легкі та швидкі аналоги.

Capstone [7] – це легкий мультиплатформений фреймворк для дизасемблювання. Його головна особливість – це мультиархітектурність: Arm, Arm64 (Armv8), BPF, Ethereum Virtual Machine, M68K, M680X, Mips, MOS65XX, PowerPC, RISC-V, Sparc, SystemZ, TMS320C64X, Web Assembly, XCore & X86 (включаючи X86_64).

Але даний дизасемблер також не відповідає потребам, оскільки в результаті його роботи не повертається повний набір команд. Крім того, він має обмеження на розмір виконуваних файлів та може займати багато часу для обробки файлів розміром більше 5 Мб, а іноді призводить до аварійного завершення програми. Незважаючи на ці недоліки, даний дизасемблер може працювати з будь-яким типом файлів.

Інший дизасемблер, який був розглянутий, є утилітою, що йде разом з Visual Studio 2019. Програма дампу двійкових файлів DUMPBIN.EXE [8] відображає двійкові файли у форматі текстового файлу із командами асемблера. Вона не має обмежень на розмір вхідного виконуваного файлу і швидко їх дизасемблює, але вона може працювати лише з файлами типу .exe. Проте, цей дизасемблер повністю виконує потрібні задачі, тому саме він став основним інструментом дизасемблювання виконуваних файлів.

Постановка завдання. Метою роботи є розробка програмного забезпечення для знаходження внесених змін в код виконуваних файлів на основі обчислення ентропії дизасембльованих виконуваних файлів та порівняння її з попередніми значеннями. Для того, щоб досягти цієї мети, необхідно виконати декілька завдань.

По-перше, необхідно проаналізувати існуючі дизасемблери для виконуваних файлів та визначити найбільш відповідний вимогам роботи.

Після того, як відповідний дизасемблер знайдено, необхідно розробити програму для аналізу дизасембльованого коду. Програма повинна обчислювати метрику ентропії для всіх команд дизасембльованого коду і зберігати попередні значення для порівняння.

Нарешті, дані, отримані в програмі, повинні бути проаналізовані для того, щоб зробити висновки щодо авторства змін, внесених до коду, порівнюючи поточну метрику ентропії з попередніми значеннями: чи були зміни внесені автором, чи кимось іншим.

Виклад основного матеріалу дослідження. Для досягнення мети роботи будемо використовувати значення ентропії [9]. Поняття ентропії вперше було введено Рудольфом Клаузіусом

в термодинаміці для визначення міри зворотного розсіювання енергії. Ентропію найчастіше розуміють як «непотрібну енергію» у системі, тобто енергію, яка не виконує жодної роботи. Вона визначена в термінах теорії ймовірності та використовується для розрахунку міри невизначеності будь-якого досвіду (випробування), який може мати різні результати.

Ентропія – міра невизначеності чи непередбачуваності інформації, невизначеність появи будь-якого символу первинного алфавіту. За відсутності інформаційних втрат ентропія чисельно дорівнює кількості інформації [10]. Наприклад, у послідовності літер, що становлять якусь фразу різними мовами, різні літери з'являються з різною частотою, тому невизначеність появи для деяких літер менша, ніж для інших. Якщо врахувати деякі поєднання літер, які зустрічаються дуже рідко, то невизначеність зменшується ще сильніше. Ентропія також може бути застосована до програмного забезпечення як міра взаємодії. Так, розглядаючи ентропію вихідного коду, який може бути розбитий на дрібніші сегменти (рядки, функції, змінні, команди і т.д.), можна визначати авторство тієї чи іншої частини коду. Таким чином, можна обчислити внесок різних авторів у написану програму. Для розрахунку ентропії в теорії інформації використовується наступна формула [10]:

$$H(i) = -p_i \cdot \log_2(p_i), \quad (1)$$

де: i – можливі стани,

p_i – ймовірність появи i -го стану.

У випадку з програмним кодом у ролі станів виступають команди, і, відповідно, ймовірність їх появи в коді. Також ентропійний метод використовується для вирішення таких завдань, як пошук зашифрованого або запакованого шкідливого програмного забезпечення.

В результаті роботи було розроблене програмне забезпечення DisEn, яке побудоване на .NET Framework з інтерфейсом WPF з використанням мови програмування C#. Основним завданням цього програмного забезпечення є визначення авторства внесених змін в код виконуваних файлів на основі обчислення ентропії дизасембльованих виконуваних файлів. Це дозволяє користувачам визначити, чи був файл змінений автором або якимось шкідливим програмним забезпеченням [11].

Програма дозволяє дизасемблювати необхідний виконуваний файл, отримуючи таким чином асемблерний код, розрахувати значення ентропії для кожної команди та проаналізувати отримані дані з точки зору різниці ентропії. Ці дані відображаються у відповідній таблиці та на діаграмі

у основному вікні програми. Програма зберігає зліпки файлів за іменами для подальшого порівняння на предмет авторства змін.

На вхід програмі подається файл типу .exe, який треба проаналізувати. Алгоритм роботи програми наступний.

1) Дизасемблювання вхідного файлу. Дизасемблювання здійснюється за допомогою утиліти dumpbin.exe [8], яка входить до складу Microsoft Visual Studio. Команда для дизасемблювання: "dumpbin.exe /disasm /out:NAME.txt NAME.exe", де /disasm – опція дизасемблювання; /out:NAME.txt – ім'я вихідного файлу, в який буде записано результат; NAME.exe – ім'я файлу, який необхідно дизасемблювати. В результаті отримуємо файл формату .txt, в якому будемо підраховувати кількість команд. Також є можливість переглянути дизасембльований код програми, який зберігається в текстовому файлі.

2) Розрахунок значення ентропії кожної команди для дизасембльованого файлу. Розрахунок здійснюється за формулою (1). Усі отримані значення ентропії записуються у файл.

3) Розрахунок різниці ентропії. Зчитуємо значення ентропії для кожної команди оригінального файлу та відповідного йому зміненого, підраховуємо різницю для них, записуємо результат у файл.

4) Порівняння різниці ентропії відповідних команд з експериментальними пороговими значеннями для цих команд.

На наступних рисунках можна побачити роботу розробленого програмного забезпечення DisEn. В якості прикладу для аналізу було взято програму для рендерингу 3D-об'єктів, створену авторами цієї статті (перша версія відображає лише каркас, наступна версія реалізувала растеризацію трикутників).

На рис. 1 приведено частину дизасембльованого виконуваного файлу Renderer.exe, результат роботи збережено у файл Renderer.txt.

На рис. 2 приведено результат аналізу дизасембльованого файлу Renderer.txt: розраховано значення ентропії для кожної команди та побудовано відповідну гістограму. Ці дані представлені у двох частинах вікна програми: зліва інформація виводиться у формі таблиці, відображаючи кількість викликів кожної команди і розраховане значення ентропії; праворуч у форматі стовпчатої діаграми зображено значення ентропії для кожної команди.

Програмне забезпечення DisEn зберігає інформацію про попередню версію яку вважаємо еталонною, або зліпок файлу за найменуванням.



Рис. 1. Результат дизасемблювання файлу Renderer.exe



Рис. 2. Результат аналізу дизасембльованого файлу Renderer.txt.

Якщо якийсь файл вже було опрацьовано і буде завантажено новий з такою самою назвою, буде проведено порівняння цих файлів. На основному вікні буде відображено інформацію про значення ентропії команд двох файлів.

На рис. 3 приведено інформацію про дві версії файлу, що аналізується: у верхній частині вікна – про поточну версію, у нижній частині – про попередню.

За необхідності користувач може відкрити додаткове вікно та деталізувати інформацію про різницю в значенні ентропії, кількості команд та розміру файлів. Такий приклад наведено на рис. 4.

Головна мета програмного забезпечення DisEn – це знаходження оптимального способу для розрізнення виконавчих файлів, що змінилися

автором або шкідливим програмним забезпеченням. Прикладом того, наскільки файли можуть відрізнитись один від одного, може слугувати порівняння виконавчого файлу гри та інсталятора. На рисунках 5 та 6 можна побачити різницю між цими двома файлами.

Таким чином, на основі такої різниці можна визначати, наскільки виконавчий файл був змінений і чи може це бути авторським втручанням чи шкідливою ін'єкцією коду.

Висновки. Розроблене програмне забезпечення DisEn допомагає знаходити зміни коду виконуваних файлів та робити висновки на предмет авторства цих змін за рахунок аналізу дизасембльованого коду виконуваних файлів, обчислення ентропії та порівняння з попередніми значеннями. Розроблена



Рис. 3. Приклад порівняння двох версій файлу, що аналізується

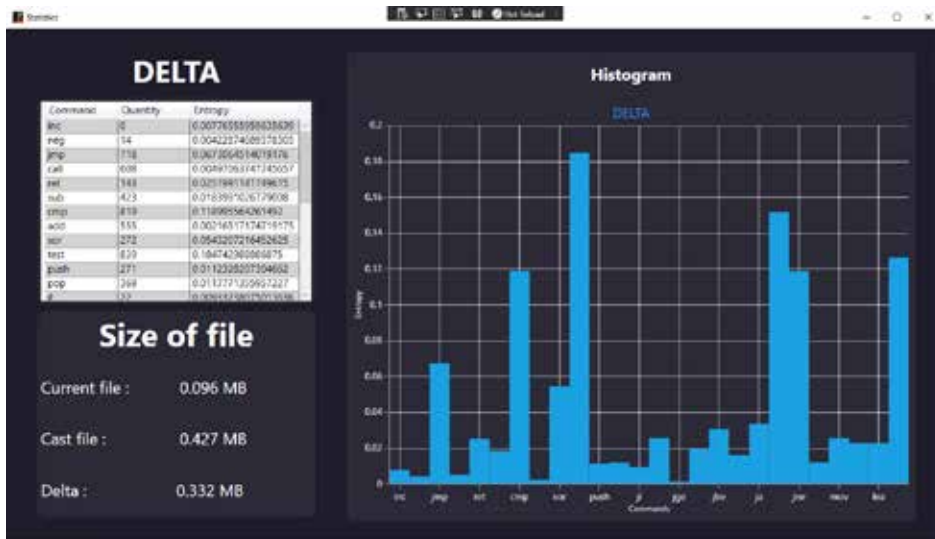


Рис. 4. Детальна інформація про різницю ентропій між двома файлами



Рис. 5. Приклад порівняння між грою та інсталятором

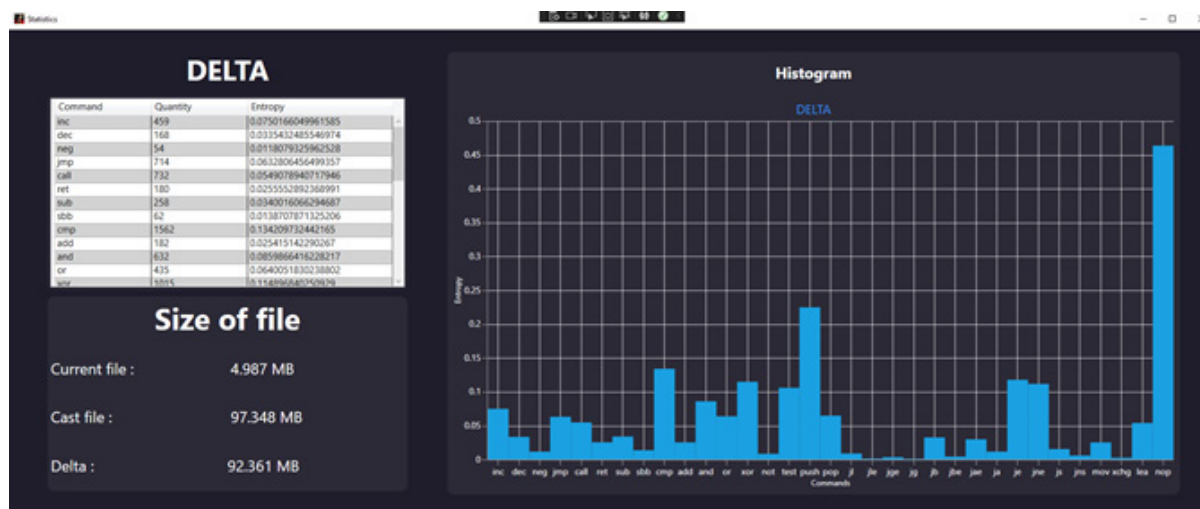


Рис. 6. Приклад детальної інформації про порівняння між грою та інсталятором

програма може бути використана, зокрема, для валідації існуючих файлів. В подальшому передбачається удосконалення розробленої програми за рахунок додавання математичної моделі для

прогнозування авторства внесених змін. Також планується реалізувати можливість налаштування списку команд для розрахунку ентропії для більш гнучкого використання програми.

Список літератури:

1. Каплун В.А., Майданюк В.П. Захист операційних систем. Навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ, 2006. 180 с.
2. Що таке ін'єкція коду в Windows? URL: <https://www.thefastcode.com/uk-uah/article/what-is-code-injection-on-windows> (дата звернення 10.11.2022).
3. Бурячок В.Л., Аносов А.О., Семко В.В., Соколов В.Ю., Складанний П.М. Технології забезпечення безпеки мережевої інфраструктури. К.: КУБГ, 2019. 218 с.
4. Shannon C.E., Weaver W. The Mathematical Theory of Communication. The University of Illinois Press, 1971. 144 p.
5. IDA Pro. URL: <https://hex-rays.com/ida-pro/> (дата звернення 17.11.2022).
6. Immunity Debugger. URL: <https://www.immunityinc.com/products/debugger/> (дата звернення 19.11.2022).
7. Capstone. The Ultimate Disassembler. URL: <https://www.capstone-engine.org/> (дата звернення 21.11.2022).
8. Microsoft Visual Studio disassembler dumpbin. URL: <https://learn.microsoft.com/en-us/cpp/build/reference/dumpbin-reference?view=msvc-170> (дата звернення 23.11.2022).
9. Энтропия. Как хаос помогает искать вирусы. URL: <https://xakep.ru/2021/01/29/viruses-entropy/> (дата звернення 05.11.2022).
10. Шарапов О.Д., Дербенцев В.Д., Семьонов Д.С. Економічна кібернетика. Навч. посібник. К.: КНЕУ, 2004. 231 с.
11. Макарова Л.М., Камінський С.С., Бризгалов М.В. Використання ентропії для знаходження внесення змін коду виконуваних файлів. *Інформаційні технології: моделі, алгоритми, системи (ITMAS-2022): Матеріали III Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції (26-28 жовтня 2022 р.)*. Миколаїв: НУК імені адмірала Макарова, 2022. С.77-79.

Makarova L.M., Kaminsky S.S., Bryzgalov M.V. DEVELOPMENT OF SOFTWARE FOR DETECTING CHANGES MADE TO THE CODE OF EXECUTABLE FILES

The aim of this work is to develop software for detecting changes made to the code of executable files. It is known that the development of modern computer technologies gives rise to many new opportunities and optimizations of common processes. However, each process is based on data transfer and code execution on a computer, which includes complex processes of converting code into machine language. The larger and more complex these systems become, the higher the security requirements at each stage of development and the more

potential weaknesses they have. One such vulnerability is code injection into an executable file. These cases can lead to huge losses, the potential danger of losing important data and its exposure to third parties.

Various metrics have been studied to determine the authorship of software code, and thus to detect the introduction of malicious code. The article considers one of the ways to solve this problem, namely, counting metrics of source or executable program code. The quantitative metric entropy is defined, which is well suited for verifying the authorship of program code, and it is shown that using this metric it is possible to state with high probability whether a new section of code was written by the program developer or not.

The result of the work is DisEn, a software for detecting changes made to the code of executable files built on the .NET Framework using the C# programming language, which allows you to check executable files for changes and helps users determine whether the file has been modified by the author or malware. The main functionalities of DisEn are: disassembling executable files to obtain assembly code, calculating the entropy value for each command, comparing the data with the previous version of the file (if available), analyzing the data in terms of entropy differences, displaying the data in the form of tables and graphs, saving file copies by name for further comparison for the authorship of changes.

Key words: *entropy, disassembly, executable file, code change, software application.*

Маріяш Ю.І.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Степанець О.В.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Любицький С.В.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

СПОСІБ РЕАЛІЗАЦІЇ МОДЕЛЬНО-ПРОГНОЗУЮЧОГО КЕРУВАННЯ ПАРАМЕТРАМИ РЕЖИМУ ДУТТЯ КИСНЕВО-КОНВЕРТЕРНОГО ПРОЦЕСУ В ПРОГРАМОВАНОМУ ЛОГІЧНОМУ КОНТРОЛЕРІ

Стаття направлена на розробку сучасних систем автоматичного керування, які повинні забезпечувати високі показники якості роботи в умовах змінних режимів роботи промислового обладнання за рахунок ефективних структур та алгоритмів керування. Мета дослідження полягає у зниженні собівартості киснево-конвертерної сталі, що є наслідком підвищення частки металобрухту за рахунок підвищення ступеня допалювання CO до CO₂ в порожнині конвертера, шляхом оптимального керування параметрами дуттєвого режиму з використанням модельно-прогнозуючого керування. Було розглянуто дуттєвий режим киснево-конвертерної плавки як технологічний об'єкт керування, виконано аналіз проблематики регулювання параметрів дуття в умовах нестаціонарності швидкості зневуглецювання металу. Наявні системи автоматичного керування не задовольняють в повній мірі вимогам, що висуваються до якості роботи системи при програмному керуванні параметрами режиму дуття та стабілізації збурень. Значна нестаціонарність швидкості зневуглецювання металу, стохастичність вимірювання технологічних параметрів, взаємопов'язаність контурів є причинами такої ситуації. Звідси випливає необхідність застосування удосконалених систем автоматичного регулювання, до яких відноситься модельно-прогнозуюче керування. Застосування модельно-прогнозуючого регулятора дозволило покращити якість регулювання для контуру витрати кисню на 39% та для контуру регулювання вмісту CO₂ у конвертерних газах на 97%; максимальне динамічне відхилення вмісту CO₂ у конвертерних газах було знижено на 16,5% у порівнянні з комбінованою системою регулювання. Розглянуто реалізацію програмно-апаратної системи керування з використанням модельно-прогнозуючого регулятора на базі програмованого логічного контролера. Отримані результати моделювання підтвердили підвищення якості роботи системи автоматичного керування в порівнянні з комбінованою системою регулювання, звідки випливає доцільність застосування удосконаленої системи автоматичного регулювання з використанням модельно-прогнозуючого керування.

Ключові слова: модельно-прогнозуюче керування, оптимальне керування, квадратичний функціонал, киснево-конвертерний процес, модель в просторі станів, алгоритм керування.

Постановка проблеми. Сучасний киснево-конвертерний процес (ККП) є високотехнологічним і автоматизованим виробництвом, яке забезпечене великою кількістю контрольно-вимірювальної та регулюючої апаратури. У сучасних умовах розвитку металургійного виробництва актуальними являються завдання по розробці ресурсозберігаючих технологічних режимів виплавки сталі, теоретичних і практичних аспектів нових енергозберігаючих способів продувки

та підвищення ефективності засвоєння теплової енергії [1]. При ручному управлінні хід продувки часто відхиляється від оптимального, порушується процес шлакоутворення, у результаті чого шлак або звертається, або спінюється, що призводить до виносів та викидів. Тільки 45–50% плавки, а іноді й менше, випускають при ручному управлінні з першої спроби [2]. Важливими параметрами режиму дуття є інтенсивність продувки, висота фурми над рівнем спокійної ванни, гли-

бина проникнення, тиск та кількість струменів кисню [3]. Завдання керування ККП – отримання металу з певним хімічним складом і температурою по завершенню процесу продувки. Однак пряме вимірювання цих параметрів упродовж продувки неможливе внаслідок відсутності відповідних датчиків, які можуть працювати в умовах ККП [4]. За таких умов актуальним є застосування алгоритмів керування, що дають змогу вести процес за оптимальним режимом.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Для побудови автоматизованої системи керування (АСК) ККП використовують різноманітні підходи: застосування статичних і динамічних прогнозованих моделей [5] (рекомендації щодо доведення плавки за результатами проміжних вимірів та історії «вдалих» плавки); контроль вихідних параметрів плавки [6]; динамічне керування продувкою [7]. Наприклад, у статті [8] використання нейронних мереж зі зворотнім поширенням дозволяє провести аналіз великих наборів даних, щоб забезпечити оптимізацію процесу плавки. Оптимальне динамічне керування режимом дуття з використанням прогнозуючих моделей [9] дозволило Zhang та ін. покращити отримання наприкінці продувки металу з певним хімічним складом і температурою, що сприяло підвищенню якості сталі. Однак підвищення температури металу призводить до перегріву елементів водоохолоджуючих конструкцій та зниження продуктивності агрегату.

Завдання на витрату дуття під час продувки визначається з урахуванням гами протилежних вимог, примирити які неможливо без компромісів. У традиційних способах інтенсивністю продувки керують за інформацією про початкові умови і швидкості декарбонізації або по температурі конвертерних газів. Критерієм управління є запобігання викидів металу. Однак дотримання цієї умови знижує продуктивність агрегату і надійність управління через перегрів елементів водоохолоджуючих конструкцій [10]. При статичному управлінні плавкою прагнуть забезпечити отримання заданих значень масової частки вуглецю і температури, задаючись усередненими значеннями масових часток вуглецю ванни, що окислюється до СО в порожнині конвертера за рахунок кисневого дуття, оксидів заліза і марганцю в кінцевому шлаку [11]. Ці параметри в основному залежать від дуттєвого режиму. Для врахування ступеня засвоєння кисню ванною інтенсивність продувки по її ходу коригують на основі інформації про тепловий потік на водоохолоджуючих

елементах [12]. На практиці витрату кисню на продувку підтримують на максимально високому рівні під час продувки. Це викликано бажанням знизити тривалість продувки, що повинно збільшити продуктивність конвертера. Однак висока інтенсивність продувки може не забезпечити розплавлення лому до кінця режиму дуття, а також ускладнити формування шлаку.

При динамічному управлінні витратою дуття [6] вимірюють початкові умови (число змін футерування конвертера при експлуатації ОКГ, насипну щільність брухту, масову частку кремнію в чавуні і його температуру), температурне розширення екранних труб підйомного газоходу ОКГ і в результаті вимірювань вводять корекцію, що враховує перехідний режим теплової роботи елементів водоохолоджуючих конструкцій у вигляді похідної від температурного лінійного розширення елементів. Висота розташування фурми має оптимальні межі. При надмірно високому розташуванні фурми кінетична енергія струменів втрачається на шляху до зустрічі з ванною, тому кисневі струмені не вступають в реакцію ("поверхневий обдув"); при надмірно низькому положенні ("жорстке продування") посилюються викиди крапель металу газами і пошкоджується фурма, істотно сповільнюється шлакоутворення через зменшення кількості FeO в шлаку [13]. Оптимальна висота зазвичай знаходиться в межах від 1,0 до 2,5 м, що відповідають відстані до рівня ванни в спокійному стані висота зазвичай зростає при збільшенні місткості конвертера і залежить від особливостей прийнятої в цеху технології. У публікації [14] Охотський В. Б. зазначає, що не змінюючи відстань фурми під час продувки не можливо досягти економічної ефективності процесу. Зміну висоти положення фурми під час продувки, зазвичай, використовують для регулювання окислення шлаку і прискорення його формування. Великий розвиток отримало нечітке керування положенням фурми [15], метою якого є підвищення частки CO₂ у газах, що відходять.

Постановка завдання. Метою роботи є реалізація оптимального керування параметрами дуттєвого режиму з використанням модельно-прогнозуючого керування (МПК) на базі програмованого логічного контролера, що дозволить підвищити частку металобрухту за рахунок підвищення ступеня допалювання СО до CO₂ в порожнині конвертера.

Виклад основного матеріалу дослідження. Виконаємо синтез модельно-прогнозуючого регулятора (МПР) з квадратичним функціоналом при наяв-

ності обмежень режиму дуття киснево-конвертерної плавки. Розробка модельно-прогнозуючого регулятора складається з таких основних етапів: побудова прогнозуючої моделі; визначення функціоналу, що характеризує якість регулювання; рішення оптимізаційної задачі – пошук оптимальної стратегії керування, що забезпечує мінімум функціоналу. Для побудови прогнозуючої моделі МПР використаємо математичну модель режиму дуття киснево-конвертерного процесу [16]. Для системи автоматичного регулювання продувки киснево-конвертерного процесу розглядається задача програмного керування та стабілізації при виникненні збурень, тому необхідно перейти до інкрементної форми (1) прогнозуючої моделі в просторі станів:

$$\Delta u(t) = u(t) - u(t-1) \Rightarrow u(t) = u(t-1) + \Delta u(t) \quad (1)$$

$$x'(t) = Ax(t) + Bu(t-1) + B\Delta u(t).$$

Для цього введемо новий стан $x_u(t) = u(t-1)$ та розширимо (2) систему:

$$\begin{cases} x'(t) = Ax(t) + Bu(t-1) + B\Delta u(t) \\ x'_u(t) = x_u(t) + \Delta u(t). \end{cases} \quad (2)$$

В результаті отримано прогнозуючу модель (3) режиму продувки киснево-конвертерного процесу у вигляді керованої канонічної форми моделі в просторі станів:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} x'(t) \\ x'_u(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ x_u(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ I \end{bmatrix} \Delta u(t) \\ y(t) = [C \ 0] \begin{bmatrix} x(t) \\ x_u(t) \end{bmatrix}. \end{cases} \quad (3)$$

Виконаємо перетворення неперервної моделі (3) в дискретну модель (4) в просторі станів використовуючи метод Ейлера [17]:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \\ x_3(k+1) \\ x_4(k+1) \\ x_5(k+1) \\ x_6(k+1) \\ x_u(k+1) \\ x_H(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_d & B_d \\ 0 & I \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \\ x_3(k) \\ x_4(k) \\ x_5(k) \\ x_6(k) \\ x_u(k) \\ x_H(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_d \\ I \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta u_{VO_2}(k) \\ \Delta H(k) \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} v(k) \\ \gamma_{CO_2}(k) \end{bmatrix} = [C_d \ 0] \cdot \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \\ x_3(k) \\ x_4(k) \\ x_5(k) \\ x_6(k) \\ x_u(k) \\ x_H(k) \end{bmatrix}. \end{cases} \quad (4)$$

В результаті отримано нові матриці \bar{A}_d , \bar{B}_d , \bar{C}_d (5) керованої канонічної дискретної форми моделі в просторі станів:

$$\bar{A}_d = \begin{bmatrix} 1 - \frac{T_0}{T_v^{uO_2}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{T_0}{T_v^{uO_2}} & 0 \\ 0 & 1 & T_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & T_0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{T_0}{T_{VCO_2}^{uO_2}} & -\frac{T_0 T_{VCO_2}^{uO_2}}{T_{VCO_2}^{uO_2}} & 1 - \frac{T_0 T_{VCO_2}^{uO_2}}{T_{VCO_2}^{uO_2}} & 0 & 0 & \frac{T_0}{T_{VCO_2}^{uO_2}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & T_0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{T_0}{T_{VCO_2}^{uO_2}} & 1 - \frac{T_0 T_{VCO_2}^{uO_2}}{T_{VCO_2}^{uO_2}} & 0 & \frac{T_0}{T_{VCO_2}^{uO_2}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (5)$$

$$\bar{B}_d = \begin{bmatrix} \frac{T_0}{T_v^{uO_2}} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{T_0}{T_{VCO_2}^{uO_2}} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{T_0}{T_{VCO_2}^{uO_2}} \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad \bar{C}_d = \begin{bmatrix} k_{v^{uO_2}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_{\gamma_{CO_2}^{uO_2}} & 0 & 0 & k_{v^H} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

де

$$k_{\gamma_{CO_2}^H} = 12,15 \text{ \%}/\text{M}; k_{v^{uO_2}} = 6 \text{ M}^3 / (\text{x}\theta \cdot \text{\%}); k_{\gamma_{CO_2}^{uO_2}} = -0,756 \frac{\text{\%CO}_2}{\text{\%uO}_2};$$

$$T_0 = 0,1c; T_v^{uO_2} = 1,2c; T_{VCO_2}^{uO_2} = 9,55c; T_{2VCO_2}^{uO_2} = 14,98c; T_{3VCO_2}^{uO_2} = 7,05c;$$

$$T_{VCO_2}^H(\tau) = T_v^H T_{VCO_2}^{v^H} = 15,16 \cdot e^{-\left(\frac{\tau-3,47}{2,9}\right)^2} + 14,21 \cdot e^{-\left(\frac{\tau-15,57}{2,6}\right)^2} + 24,68 \cdot e^{-\left(\frac{\tau-9,73}{6,0}\right)^2} [c];$$

$$T_{2VCO_2}^H(\tau) = T_v^H + T_{VCO_2}^{v^H} = 7,05 \cdot e^{-\left(\frac{\tau-3,47}{2,9}\right)^2} + 6,61 \cdot e^{-\left(\frac{\tau-15,57}{2,6}\right)^2} + 11,48 \cdot e^{-\left(\frac{\tau-9,73}{6,0}\right)^2} + 2,15 [c].$$

τ – час від початку продувки, хв.

Для реалізації модельно-прогнозуючого регулятора було обрано провідне, незалежне від виробника ПЛК програмне забезпечення автоматизації систем керування CODESYS V3.5 [18], що відповідає вимогам стандарту ІЕС 61131-3. Був запрограмований функціональний блок прогнозуючої моделі МПР (рис. 1). Код відповідного функціонального блоку доступний за посиланням https://drive.google.com/drive/folders/19ipMsPrWhdqQZB5xW9l6DWuikaKBeQSQ?usp=share_link.

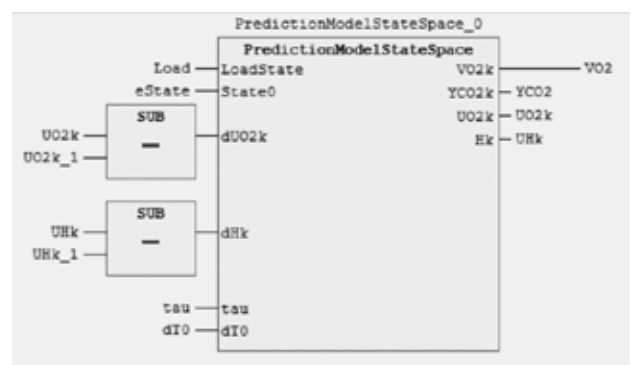


Рис. 1. Функціональний блок прогнозуючої моделі МПР

Математична модель для прогнозу у якості початкових умов використовує поточний стан сис-

теми. Оскільки поточний стан системи виміряти не є можливим, необхідно розробити спостерігач стану. Для розглянутої системи виконується критерій Калмана [19] щодо спостережуваності та керуваності, оскільки ранг відповідних матриць дорівнює кількості станів системи, а, отже, може бути розроблений спостерігач стану та регулятор. Структурна схема спостерігача стану системи наведена на рисунку 2, в якості спостерігача було використано спостерігач Луенбергера.



Рис. 2. Структурна схема спостерігача стану системи

Перевага використання спостерігача Луенбергера – наявність додаткового контуру корекції стану при виникненні розбіжності між моделлю та реальною поведінкою об'єкту [20]. Математична модель спостерігача Луенбергера (6) представлена у вигляді рівняння:

$$x_e'(k) = A \cdot x_e(k) + B \cdot \begin{bmatrix} u_{CO_2}(k) \\ H(k) \end{bmatrix} + L \cdot \left(\begin{bmatrix} v(k) \\ \gamma_{CO_2}(k) \end{bmatrix} - C \cdot x_e(k) \right), \quad (6)$$

де $L = \begin{bmatrix} l_1 & 0 \\ 0 & l_2 \\ 0 & l_3 \\ 0 & l_4 \\ 0 & l_5 \\ 0 & l_6 \end{bmatrix}$ – дискретизована матриця компенсатора спостерігача.

Розробка компенсатора спостерігача L залежить від бажаного характеристичного рівняння: $(s - \beta_1) \cdot (s - \beta_2) \cdot \dots \cdot (s - \beta_n) = 0$. Полоси спостерігача повинні забезпечувати швидку збіжність похибки спостереження $\left(\begin{bmatrix} v(k) \\ \gamma_{CO_2}(k) \end{bmatrix} - C \cdot x_e(k) \right)$ до 0. Це означає, що похибка оцінки спостерігача повинна зменшуватись в 2-5 разів швидше, ніж стан самого об'єкту [20].

Розглянемо модель (8) та знайдемо l_1 компенсатора спостерігача. Враховуючи динамічні властивості об'єкту для синтезу спостерігача, власні значення матриці є $\beta_1 = -2.5$. Для пошуку l_1 використаємо формулу Аккермана [21]. У результаті виконання функції acker пакету

MATLAB [22], що реалізує формулу Аккермана, $l_1 = 0.023$. Аналогічно для $\beta_{2-4} = -0.75$ та $\beta_{5,6} = -1$ отримано $l_2 = 0.01; l_3 = -0.0019; l_4 = 0.0001; l_5 = 0.0081; l_6 = -0.0017$.

Був запрограмований функціональний блок (рис. 3) спостерігача стану Луенбергера. Код відповідного функціонального блоку доступний за посиланням https://drive.google.com/drive/folders/19ipMsPrWWhdqQZB5xW9l6DWuikaKBeQSq?usp=share_link.

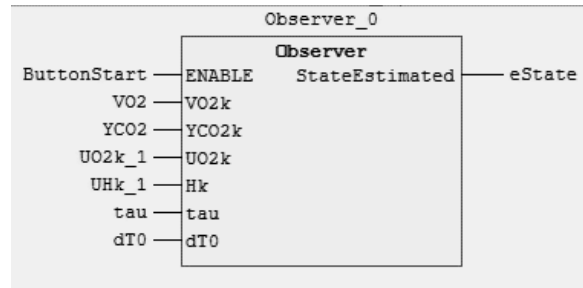


Рис. 3. Функціональний блок спостерігача стану Луенбергера

Наступним важливим елементом МПР є функціонал. Якість управління охарактеризуємо за допомогою квадратичного функціоналу (7):

$$J_k(\bar{y}, \Delta \bar{u}) = \sum_{j=1}^P \left[(y_{k+j} - r_{k+j})^T R (y_{k+j} - r_{k+j}) + \Delta u_{k+j-1}^T Q \Delta u_{k+j-1} \right], \quad (7)$$

де R та Q – додатно визначені симетричні матриці; P – кількість кроків горизонту прогнозу. Виконаємо вибір горизонту прогнозу виходячи з динаміки процесу та коефіцієнтів матриць R та Q відповідно до якості бажаного перехідного процесу системи керування: $R = \begin{bmatrix} 0.2 & 0 \\ 0 & 1.5 \end{bmatrix}; Q = \begin{bmatrix} 0.2 & 0 \\ 0 & 0.03 \end{bmatrix}; P = 35$. Горизонт керування C – горизонт, в межах якого керуюча дія може змінюватись. Як видно з рис. 4, при збільшенні горизонту прогнозу якість регулювання зростає до критичної точки (35 кроків), після якої якість вже не зростає, але складність обчислень збільшується в геометричній прогресії. Для забезпечення необхідної якості регулювання системи керування було обрано горизонт керування в 5 кроків.

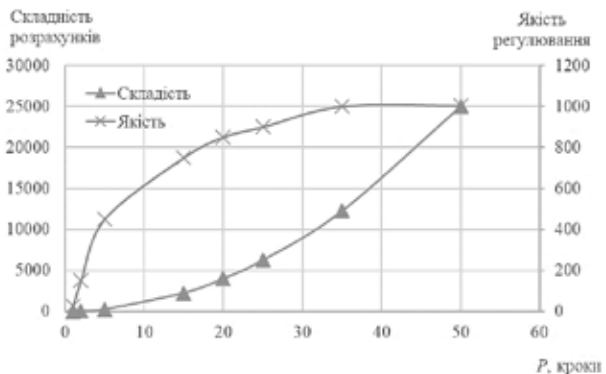


Рис. 4. Залежність складності розрахунків та якості регулювання від горизонту P

Був запрограмований функціональний блок функціоналу. Код відповідного функціонального блоку доступний за посиланням https://drive.google.com/drive/folders/19ipMsPrWhdqQZB5xW9l6DWuikaKBeQSq?usp=share_link.

Для пошуку оптимальної стратегії керування було сформовану задачу оптимізації функціоналу (7) при наявності обмежень (8):

$$\begin{aligned}
 J_k &= J_k(\bar{y}(\Delta\bar{u}), \Delta\bar{u}) = J_k(\Delta\bar{u}) \rightarrow \min_{\Delta\bar{u} \in E^{n^p}} \\
 H_{\min} &\leq H(t) \leq H_{\max} & u_{\min} &\leq u_{\text{O}_2}(t) \leq u_{\max} \\
 dH_{\min} &\leq \frac{dH(t)}{dt} \leq dH_{\max} & du_{\min} &\leq \frac{du_{\text{O}_2}(t)}{dt} \leq du_{\max} \quad (8) \\
 H_{\min} &= 1.5M & u_{\min} &= 0\% \\
 H_{\max} &= 3.0M & u_{\max} &= 100\% \\
 dH_{\min} &= -0.2\%/c & du_{\min} &= -25\%/c \\
 dH_{\max} &= 0.2\%/c & du_{\max} &= 25\%/c
 \end{aligned}$$

Задачу з оптимізації при наявності обмежень вирішимо за допомогою методу штрафних функцій (штрафна функція – квадратична). Мінімізація функціоналу при наявності обмежень зводиться до стандартної задачі багатовимірної оптимізації. Штрафна функція визначається виразом (9):

$$\begin{aligned}
 F(\Delta u) &= J_k(\Delta\bar{u}) + P(r, l(\Delta u)) \\
 r &- \text{штрафний параметр,} \\
 l(\Delta u) &- \text{обмеження.}
 \end{aligned} \quad (9)$$

Обраний квадратичний функціонал є опуклою функцією, тому має місце задача опуклого програмування. Квадратичний функціонал заданий алгоритмічно, тому було застосовано методи нульового порядку. Їх застосовують у тих випадках, коли з якихось причин визначення градієнта цільової функції неможливе, а також у тих випадках, коли функція задана алгоритмічно, зокрема, коли для обчислення значень функції за тих чи інших значеннях аргументу потрібно провести натурний або числовий експеримент. У якості методу оптимізації було обрано метод Хука-Дживса [23], який показав оптимальне співвідношення між кількістю кроків та обрахунків цільової функції при вирішенні оптимізаційної задачі у порівнянні з симплексним методом та методом найшвидшого спуску. Пошук згідно цього методу складається із послідовності кроків пошуку для дослідження функції навколо базисної точки, з якої у випадку успіху робиться пошук за зразком.

Був запрограмований функціональний блок (рис. 5) методу оптимізації Хука-Дживса. Код відповідного функціонального блоку доступний за посиланням https://drive.google.com/drive/folders/19ipMsPrWhdqQZB5xW9l6DWuikaKBeQSq?usp=share_link.

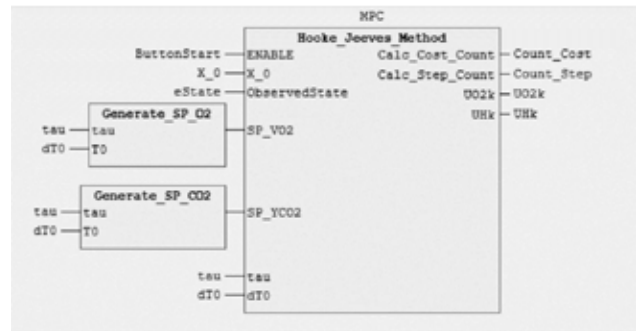


Рис. 5. Функціональний блок методу оптимізації Хука-Дживса

Процедура імітаційного моделювання МПК параметрами дуття ККП виконувалась у середовищі Matlab Simulink (модель процесу) та SoftPLC CODESYS V3.5 (МПП). У середовищі Matlab Simulink було обрано алгоритм вирішення рівнянь Euler зі постійною величиною кроку (fixed-step) 0.1с. Абсолютна і відносна точність розрахунків – 0,001. У середовищі програмування CODESYS V3.5 тип виконання основної задачі заданий циклічний з кроком 0.1с, що достатньо для реального процесу. Комунікація між Matlab Simulink та CODESYS V3.5 виконується за допомогою протоколу OPC UA. Виконаємо моделювання перехідних характеристик системи автоматичного регулювання режиму дуття киснево-конвертерного процесу з використанням модельно-прогнозуючого підходу. Розглянемо перехідну характеристику системи регулювання інтенсивністю дуття кисневого конвертера з наперед визначеною зміною завдання (рис. 6).

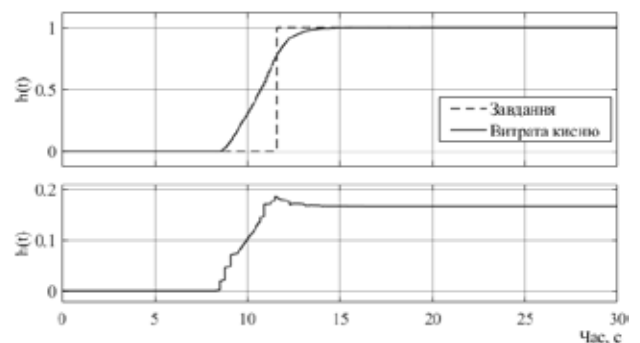


Рис. 6. Перехідна характеристика системи регулювання продукції киснем

Для системи регулювання вмісту CO₂ під час продувки киснево-конвертерного процесу розглядається задача програмного керування та стабілізації при виникненні збурень: зміни витрати кисню на продувку, зміна швидкості зневуглицювання, введення сипучих та ін. Перехідна характеристика

системи регулювання вмісту CO_2 з наперед визначеною зміною завдання наведена на рис. 7.

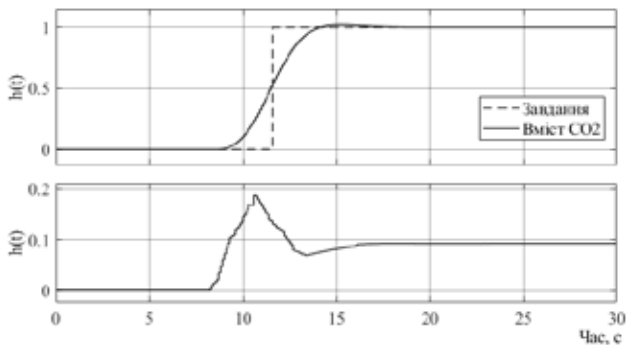


Рис. 7. Перехідна характеристика системи регулювання вмісту CO_2

Було виконано моделювання перехідних процесів режиму дуття тривалістю 20 хв для 160-тонного конвертера з модельно-прогнозуючим регулюванням та комбінованої системи регулювання з ПД-регуляторами вмісту CO_2 у димових газах та витрати кисню для задачі програмного керування. Отримані перехідні процеси системи автоматичного регулювання режиму дуття киснево-конвертерної плавки з використанням комбінованої системи автоматичного регулювання забезпечили ISE для контуру витрати кисню – 9075 та вмісту CO_2 у конвертерних газах – 1397; максимальне динамічне відхилення вмісту CO_2 у конвертерних газах склало 17,5%; з використан-

ням модельно-прогнозуючого регулятора забезпечили ISE для контуру витрати кисню – 5577 та вмісту CO_2 у конвертерних газах – 43; максимальне динамічне відхилення вмісту CO_2 у конвертерних газах склало 0,95%.

Висновки. Було розроблено систему автоматичного регулювання параметрами режиму дуття ККП і виконано її аналіз. Синтезовано спостерігач стану Луенбергера режиму дуття ККП. Враховуючи динамічні властивості об'єкту розраховано компенсатор спостерігача L на бажане характеристичне рівняння, використовуючи формулу Аккермана. Досліджено модель режиму дуття ККП на спостережливість та керованість згідно критерія Калмана. Розроблено спостерігач стану та регулятор, який забезпечує мінімізацію лінійно-квадратичного функціоналу. Квадратичний функціонал заданий алгоритмічно, тому було застосовано метод оптимізації нульового порядку – Хука-Дживса. Застосування модельно-прогнозуючого регулятора дозволило покращити якість регулювання для контуру витрати кисню на 39% (квадратичне відхилення зменшено з 9075 до 5577); для контуру регулювання вмісту CO_2 у конвертерних газах на 97% (квадратичне відхилення зменшено з 1397 до 43); максимальне динамічне відхилення вмісту CO_2 у конвертерних газах було знижено на 16,55% (з 17,5% до 0,95%) у порівнянні з комбінованою системою регулювання з ПД-регуляторами.

Список літератури:

1. Степанець О. В., Маріяш Ю.І. Модельно-прогнозуючий регулятор дуттєвого режиму киснево-конвертерного процесу. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення у сучасних технологіях. 2021. № 4 (10). С. 61–66. URL: <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2021.04.08>.
2. Основи металургійного виробництва металів і сплавів: Підручник / Д.Ф.Чернега та ін. К.: Вища школа, 2006. 503 с.
3. Глинов Г. М., Маковський В. А. АСУ ТП в чорній металургії. М.: Металлургия, 1999. 312 с.
4. В.С. Богушевський, Н.А. Рюмшин, Н.А. Сорокин АСУ ТП виробництва сталі в конвертерах: НПО «Промавтоматика», 1991. 177 с.
5. Mariash Y., Stepanets O. Model predictive control application in the energy saving technology of basic oxygen furnace. Modeling, Control and Information Technologies. 2019. No. 3. P. 124–126. URL: <https://doi.org/10.31713/mcit.2019.33>.
6. АСУ ТП конвертерного виробництва та спеціальної електрометалургії / В.С. Богушевський та ін. НПК «Київський інститут автоматики», 1997. 288 с.
7. Богушевський В. С., Сухенко В. Ю., Василенко Б. В. Управління конвертерною плавкою в режимі енергозберігаючої технології. Енергоресурсозбереження в металургійній промисловості. 2016. С. 70–71.
8. Metallurgical Data Science for Steel Industry: A Case Study on Basic Oxygen Furnace / V. Nenchev et al. steel research international. 2022. URL: <https://doi.org/10.1002/srin.202100813>.
9. Zhang J. Optimal Control Problem of Converter Steelmaking Production Process Based on Operation Optimization Method. Discrete Dynamics in Nature and Society. 2015. Vol. 2015. P. 1–13. URL: <https://doi.org/10.1155/2015/483674>.
10. В. С. Богушевський, К. М. Зубова Модель управління конвертерною плавкою на основі нечіткої логіки. Матеріали XX міжнародної конференції з автоматичного управління Автоматика-2013, Миколаїв, 27 вересня 2013 р. С. 152.

11. Contribution of CO₂ Emissions from Basic Oxygen Steelmaking Process / N. Madhavan et al. *Metals*. 2022. Vol. 12, no. 5. P. 797. URL: <https://doi.org/10.3390/met12050797>.
12. Математична модель АСУ конвертерної плавки/ В.С. Богушевський, Ю.В. Оробцев, Н.А. Рюмшин, Н.А. Сорокин: НПК «Київський інститут автоматики», 1996. 210 с.
13. Snigdha G., Bharath B. N., Viswanathan N. N. BOF process dynamics. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*. 2018. Vol. 128, no. 1-2. P. 17–33. URL: <https://doi.org/10.1080/25726641.2018.1544331>.
14. Охотський В. Б. Використання багатоканальних фурм у сталеплавильних процесах. Конвертер. Металургійна та гірничорудна промисловість. 2011. № 2. С. 28–29.
15. В. С. Богушевський, К. М. Зубова Модель управління конвертерною плавкою на основі нечіткої логіки. Матеріали XX міжнародної конференції з автоматичного управління Автоматика-2013, Миколаїв, 27 вересня 2013 р. С. 152.
16. Stepanets O., Mariiash Y. Model predictive control application in the energy saving technology of basic oxygen furnace. *Informatyka, Automatyka, Pomiar w Gospodarce i Ochronie Środowiska*. 2020. Vol. 10, no. 2. P. 70–74. URL: <https://doi.org/10.35784/iaggos.931>.
17. Petrosky-Nadeau N., Zhang L. Solving the Diamond-Mortensen-Pissarides model accurately. *Quantitative Economics*. 2017. Vol. 8, no. 2. P. 611–650. URL: <https://doi.org/10.3982/qe452>.
18. WHY CODESYS? THE RIGHT CHOICE FOR USERS AND DEVICE MANUFACTURERS ACROSS ALL INDUSTRIES URL: <https://www.codesys.com/the-system/why-codesys.html> (дата звернення: 31.03.2023).
19. Cai R.-Y., Zhou H.-C., Kou C.-H. Kalman rank criterion for the controllability of fractional impulse controlled systems. *IET Control Theory & Applications*. 2020. Vol. 14, no. 10. P. 1358–1364. URL: <https://doi.org/10.1049/iet-cta.2019.0027>.
20. Vinodh K. E., Jovitha J., Ayyappan S. Comparison of four state observer design algorithms for MIMO system. *Archives of Control Sciences*. 2013. Vol. 23, no. 2. P. 243–256. URL: <https://doi.org/10.2478/acsc-2013-0015>.
21. Costandin M., Dobra P., Gavrea B. A new proof of Ackermann's formula from control theory. *Studia Universitatis Babeş-Bolyai Matematica*. 2017. Vol. 62, no. 3. P. 325–329. URL: <https://doi.org/10.24193/subbmath.2017.3.05>.
22. Acker. Pole placement design for single-input systems ece.northwestern.edu/local-apps/matlabhelp/toolbox/control/ref/acker.html (дата звернення: 31.03.2023).
23. Moser I. Hooke-Jeeves revisited. 2009 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC), Trondheim, Norway, 18–21 May 2009. 2009. URL: <https://doi.org/10.1109/cec.2009.4983277>.

Mariiash Yu.I., Stepanets O.V., Liubyt'skyi S.V. METHOD OF IMPLEMENTATION OF MODEL PREDICTIVE CONTROL OF THE BLOWING MODE PARAMETERS OF THE BASIC OXYGEN FURNACE PROCESS IN A PROGRAMMED LOGIC CONTROLLER

The article is aimed at the development of modern automatic control systems, which should provide high performance indicators in the conditions of variable operating modes of industrial equipment due to effective control structures and algorithms. The purpose of the study is to reduce the cost of basic oxygen furnace (BOF) steel, which is a consequence of the increase in the share of scrap metal due to the increase in the degree of post-burning of CO to CO₂ in the BOF cavity, by optimal control of the parameters of the duty mode using model-predictive control. The blowing mode of basic oxygen furnace as a technological object of control was considered, the problem of control blowing parameters in conditions of non-stationarity of the rate of metal decarburization was analyzed. The existing automatic control systems do not fully satisfy the requirements for the quality of the system's operation during software control of the parameters of the blowing mode and stabilization of disturbances. Significant nonstationarity of the rate of metal decarburization, stochasticity of measurement of technological parameters, interconnectedness of contours are the reasons for this situation. This implies the need to use advanced control systems, such as model-predictive control. The use of a model-predictive controller made it possible to improve the quality of control for the oxygen flow circuit by 39% and for control the CO₂ content in BOF gases by 97%; the maximum dynamic deviation of the CO₂ content in the BOF gases was reduced by 16.5% compared to the combined control system. The implementation of a software-hardware control system using a model-predictive control based on a programmable logic controller is considered. The obtained simulation results confirmed the improvement of the quality of the automatic control system in comparison with the combined control system, which suggests the feasibility of using an improved automatic control system using model-predictive control.

Key words: model-predictive control, optimal control, quadratic functional, basic oxygen furnace, state space model, control algorithm.

Мельничук Б.П.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Шевченко В.В.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

КОМПЛЕКСНА СИСТЕМА КОНТРОЛЮ ПРОЦЕСУ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ ПРИЛАДІВ В АВТОМАТИЗОВАНОМУ ВИРОБНИЦТВІ

У статті представлено комплексну систему контролю процесу обробки деталей приладів в умовах автоматизованого виробництва, математичну модель зносу різального інструменту та блок схему проведення вимірювань зносу інструменту в режимі реального часу.

Комплексна система контролю складається із двох частин. Перша частина це система контролю рівня лінійного зносу різального інструменту в режимі реального часу на основі ультразвукової діагностики різального інструменту. Цей метод дозволить проводити вимірювання рівня зносу, а також проводити діагностику різального інструменту в режимі реального часу на верстатах із числовим програмним керуванням. Точність вимірювань ультразвукового методу, а саме часу проходження ультразвукової хвилі в тілі інструменту становить 1 нс, відповідно похибка вимірювання рівня зносу становить 2 мкм.

Друга частина це система контролю якості поверхні, а саме геометричного параметру шорсткості (R_a , R_z). Вимірювання проводяться за допомогою безконтактного методу хроматичного конфокального зондування. Цей метод дозволить проводити вимірювання на місці, що дає можливість зменшити кількість похибок, які вносяться при повторній установці деталі. Похибка цього методу становить 5%, в порівнянні з контактними методами. Оптичний метод конфокального зондування дозволяє точно виміряти шорсткість поверхні з параметром R_a 0.2-0.7. Принципова схема вимірювання за допомогою методу конфокального хроматичного зондування та результати вимірювань поверхні при різних режимах обробки представлені в роботі.

Для першої частини комплексної системи розроблена математична модель, яка показує залежність рівня лінійного зносу різального інструменту, від часу проходження ультразвукової хвилі в тілі інструменту. Також, розроблена блок-схема вимірювання зносу різального інструменту.

Впровадження комплексної системи обробки деталей приладів у виробництво дозволить підвищити точність обробки та якість поверхні деталі, що дасть можливість зменшити кількість бракованих деталей та підвищити продуктивність автоматизованого виробництва. Розроблена система також може бути використана для встановлення залежності параметрів шорсткості поверхні деталі від рівня зносу різального інструменту.

Ключові слова: параметри шорсткості, якість поверхні деталей приладів, знос різального інструменту, ультразвукова діагностика, конфокальне хроматичне зондування, автоматизоване виробництво.

Вступ. Знання рівня зносу та очікуваного терміну роботи різального інструменту є вхідними даними для оцінювання надійності та працездатності автоматизованого обладнання. Для цього створюють контрольні системи процесу різання на основі розроблених непрямих методів моніторингу зносу різального інструменту. Такі системи дозволяють в режимі реального часу проводити аналіз зносу різального інструменту, та попередити критичний знос чи поломку інструменту і, відповідно, не допустити браку деталі, забезпечити високу точність та малу шорсткість поверхні, тобто підвищити економічну ефективність виробництва [1].

Експлуатаційні характеристики деталей, які впливають на надійність і точність приладу, знаходяться в прямій залежності від параметрів шорсткості поверхні деталей цього приладу, тому дуже важливо їх обробити із наперед заданими параметрами шорсткості [2]. Використання звичайних засобів вимірювання шорсткості поверхні передбачає зняття деталі із деталетимача, та використання спеціальних пристроїв. Це збільшує час виробництва деталі та вносить частку похибок, коли виникає потреба в повторній установці. Одночасно з тим портативні прилади не можуть бути застосовані для деталей малих розмірів, або

складних геометричних форм. Тому були безконтактні методи вимірювання шорсткості на місці.

Постановка проблеми. Різальний інструмент постійно піддається зносу, із-за тертя пари «інструмент-деталь», механічних напружень, пластичних деформацій, високих температур, мастильно-охолоджуючих рідин. Це зменшує його працездатність та підвищує ризик поломки інструменту та невідповідності деталі кресленню.

Для вимірювання параметрів шорсткості традиційними методами часто необхідно знімати деталь з верстата між операціями, що може викликати деякі похибки, неточності в процесі обробки деталі. У той же час портативні прилади для вимірювання параметрів шорсткості непридатні для вимірювання деталей малих розмірів і складної геометрії, а в приладобудуванні таких деталей - більшість.

Постановка завдання. Метою є розробка комплексної системи контролю процесу обробки деталей приладів в умовах автоматизованого виробництва, яка дозволить в режимі реального часу контролювати стан та оцінювати знос різального інструменту, на основі ультразвукових досліджень та контролю якості поверхні деталей приладів, а саме геометричного параметру шорсткості в умовах безлюдного виробництва, з використанням безконтактного оптичного методу конфокального зондування, з проведенням вимірювань на місці, тобто без зняття деталі з верстату, для підвищення точності обробки деталей.

Виклад основного матеріалу досліджень. До якісних показників деталей приладів відносять такі: міцність, надійність, довговічність. Вони залежать від структури та властивостей матеріалу заготовки, термічної та хімічної обробки. Найбільш залежними від показників якості поверхні деталі є надійність та довговічність, ці параметри визначаються наступними ознаками [3]:

- фізико-механічні властивості поверхневого шару;
- шорсткістю поверхні.

Шорсткість поверхні визначається як сукупність нерівностей, які утворюють фактичний рельєф поверхні з відносно малим кроком на базовій довжині. Цей рельєф може виникнути під час обробки, в результаті утворення виступів, западин, зміцнення або руйнування поверхневого шару матеріалу та виникнення внутрішніх напружень. Показник шорсткості має великий вплив на експлуатаційні характеристики деталей та вузлів машин, такі як стійкість до зносу поверхонь в місцях контакту, витривалість, корозійну стійкість,

збереження герметичності та натягу в пресових з'єднаннях [4].

Існують два способи оцінювання шорсткості поверхні: якісна оцінка, та кількісна.

Під якісною оцінкою розуміють візуальне порівняння отриманої шорсткості з так званими еталонами – спеціально виготовленими зразками поверхні з наперед заданою та відомою шорсткістю.

Недоліками якісних методів визначення параметрів шорсткості поверхні є суб'єктивність та низька точність. Такі методи не дають детальної інформації про форму та розташування нерівностей поверхні.

Перевагою якісних методів є їх простота та низька вартість порівняно з кількісними методами.

Кількісні методи визначення параметрів шорсткості поверхні за методом проведення вимірювань ділять на два типи: контактні та безконтактні.

До контактних методів відносять методи з використанням контактних пристроїв: профілографів та профілометрів.

Ці прилади мають гостро заточену алмазну голку, що знаходиться в контакті з поверхнею деталі. При її переміщенні виникають коливання перпендикулярні поверхні, які вловлює датчик та перетворює їх в електричні сигнали. Такі прилади дозволяють забезпечити вимірювання нерівностей до 20 мкм.

Головним недоліком є те, що при контакті голки, поверхня пошкоджується, тому цей метод не може бути застосовано для вимірювання шорсткості поверхні деталей виготовлених з м'яких матеріалів. Тому було розроблено низку безконтактних методів вимірювання шорсткості поверхні: температурний, пневматичний, ультразвуковий, оптичні [5].

Найчастіше використовують оптичні методи, оскільки вони забезпечують високу роздільну здатність, точність та швидкість отримання даних, а також дозволяють проводити вимірювання безпосередньо на місці обробки деталі [6].

Одним з таких методів є метод хроматичного конфокального зондування. Він заснований на використанні явища дисперсії світла. Схема вимірювання зображена на рис. 1. Принцип вимірювання наступний: біле світло, що випромінюється джерелом S, проходить через хроматичну лінзу L. Після проходження лінзи Д, світло розкладається в спектр та фокусується на поверхні досліджуваної деталі. При цьому на поверхні фокусується лише одна довжина хвилі. Відбите світло повертається назад, та проходить через

отвір Р, який фільтрує всі довжини хвиль окрім однієї, λ_j . Датчик рухається на певній відстані від поверхні, відповідно на поверхню буде фокусуватися постійно одна з довжин хвиль, залежно від глибини впадини чи виступу.

Датчиком є конфокальний хроматичний сенсор. В залежності від шорсткості використовують датчик з діапазоном чутливості 100 нм, який має роздільну здатність 5 нм, або з діапазоном чутливості 400 нм та роздільною здатністю 22 нм.

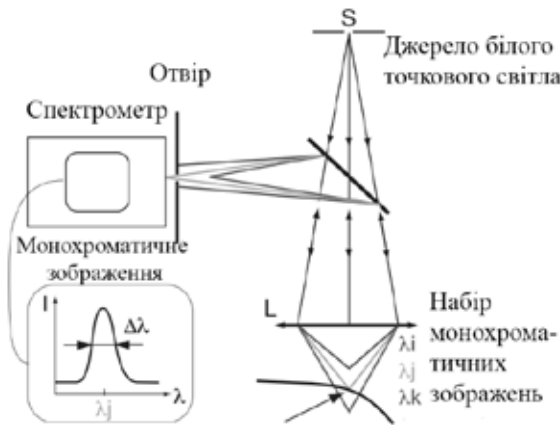


Рис. 1. Принципова схема вимірювання параметрів шорсткості

Для вимірювання на місці вимірювальна головка встановлюється на шпинделі верстата за допомогою спеціального пристрою та стандартного кріплення для тримача інструменту. Таким чином, вимірювання проводяться вздовж вертикальної теоретичної осі верстату, тобто осі Z [7].

Датчик підключений до контролера за допомогою оптоволоконного проводу. Сигнал, який надається контролером, оброблюється на комп'ютері. В залежності від потреб можна отримати як профілограму (рис. 2) так і топографію поверхні деталі після обробки.

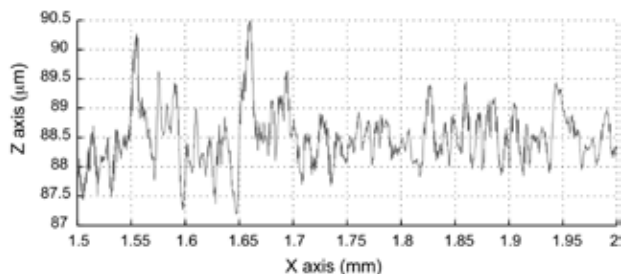


Рис. 2. Профілограма отримана методом оптичного конфокального зондування [8]

На рис. 3 зображено результати вимірювання геометрії поверхні після а) фрезерування; б) шліфування зернистість 120; в) шліфування зерни-

стість 240 [8]. Вимірювання проводились на плиті розміром 50x50 мм, виготовлено із сталі 4ХМНФС ДСТУ 7807:2015.

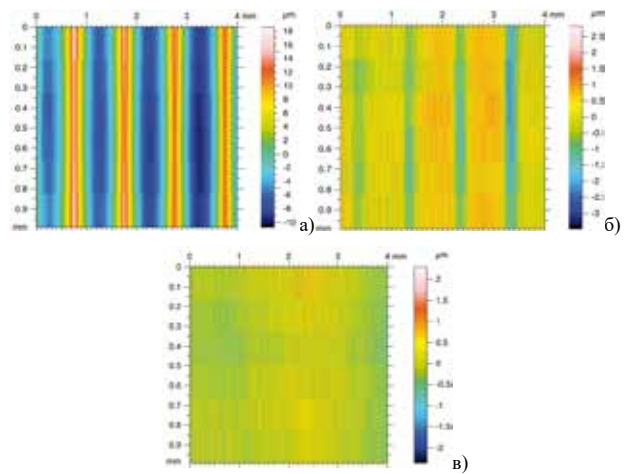


Рис. 3. Результати вимірювання геометрії поверхні [8]

Цей метод має низку переваг, порівняно з іншими оптичними методами: дозволяє проводити вимірювання будь яких поверхонь: вигнутих, дзеркальних, нахилених; має високу роздільну здатність, оскільки, в теорії світлової хвилі можна ділити багато разів; забезпечує стабільність вимірювання в різних температурних умовах, оскільки не відбувається нагріву в процесі вимірювання; світлова хвиля постійно автоматично фокусується на поверхні деталі в межах діапазону; завдяки компактності дозволяє проводити вимірювання автоматично та дистанційно, датчик можна під'єднати за допомогою оптоволоконна; світловий сигнал є стійким до впливу електромагнітного випромінювання; забезпечується довговічність завдяки використанню світлодіодів; на відміну від лазерного методу, цей є безпечним для людського ока та не потребує великих потужностей [9].

Порівняно з контактним методом, метод конфокального зондування має середню похибку 5% [8] і може точно вимірювати шорсткість поверхні з параметром Ra 0,2-0,7. Цей метод може зробити вимірювання з дуже високою точністю та задовольнити виробничі потреби у виробництві приладів.

Крім того, оскільки вимірювання виконуються під час обробки, без зняття деталі з верстату, то додаткові похибки установки не вносяться.

Методи контролю зносу інструменту поділяють на прямі та непрямі. Непрямі методи мають ряд переваг, оскільки вимірювання можна проводити безпосередньо в процесі обробки деталі. Але зазвичай такі методи потребують використання складних систем, які є недостатньо точними, та

залежними від умов обробки. Наприклад використання мастильно-охолоджуючих рідин унеможливає використання температурних та оптичних методів контролю зносу. Вимірювання зносу на основі складових сил різання потребує складної модифікації системи верстату та зменшення жорсткості системи загалом, методи акустичної емісії та вимірювання потужності різання мають низьку стійкість до зовнішніх впливів (вібрації, електромагнітні хвилі) [10].

Одним з непрямих методів є ультразвуковий метод контролю розмірного зносу різального інструменту. Заснований цей метод на вимірюванні часу проходження ультразвукової хвилі шляху «випромінювач-зношена ділянка інструменту-приймач». Маючи відомі значення швидкості поширення звуку в матеріалі легко визначити пройдений шлях. При поступовому зносі, ця дистанція буде зменшуватись, а рівень сигналу збільшуватись, оскільки площа зношеної ділянки буде зростати.

Ультразвук подається в тіло за допомогою п'єзоелектричного джерела у вигляді імпульсів. Коли звукова хвиля вдаряється об поверхню різального інструменту, то частина енергії відбивається та повертається у вигляді ехо-сигналу. Відразу після випромінювання п'єзоелемент переходить в режим приймача. Час, за який звук проходить відповідну дистанцію може бути виміряно з точністю до 1 нс, відповідно, за допомогою методу ультразвукового контролю можна визначити розмірний знос різального інструменту з точністю ± 2 мкм.

Для покращення результатів вимірювання на різальному інструменті створюється мітка, з наперед відомими розмірами. Таким чином ультразвукова хвиля, що випромінена в тіло інструменту повернеться у вигляді трьох ехо-сигналів: від калібрувальної мітки, від ділянки зносу, та найдовший шлях – від бічних поверхонь різального інструменту. Таким чином, вимірюючи різницю часу між двома сигналами можна оцінювати знос інструменту, не зважаючи на такі фактори наявність мастильно-охолоджуючих рідин чи матеріал оброблюваного інструменту, тощо [11].

В процесі вимірювання основними вважаються наступні показники: площа зношеної ділянки (S), кут падіння звукових хвиль на ділянку зносу в горизонтальній та вертикальній площинах (α_1, α_2) та температура різального інструменту ($f(T)$).

Наближену загальну площу ділянки зносу можна записати у вигляді:

$$S = W \cdot H \cdot \left(1 - k_2 + \frac{\pi}{2} k_1 k_2 \right)$$

де W – ширина ділянки зносу, H – висота ділянки зносу, k_1 та k_2 – константи, які задаються з бази даних.

Кількість енергії ехо-сигналу, пропорційна площі зношеної ділянки, тому її можна виразити наступним чином:

$$\frac{P_{omp}}{P_{випр}} \sim S^2 \text{ або } P_{omp}^{Pi3} = k_3 S^2 P_{випр} \quad (2)$$

де P_{omp}^{Pi3} – отримана частина відбитої енергії від зношеної області, $P_{випр}$ – кількість випроміненої енергії, S – площа відбиваючої поверхні, k_3 – константа.

Кількість енергії ехо-сигналу, пропорційна куту падіння α_1 в горизонтальній площині, тому її можна виразити наступним чином:

$$\frac{P_{omp}}{P_{випр}} \sim \frac{1}{\cos(\alpha_1)} \text{ або } P_{omp}^{Pi3} = k_4 \frac{1}{\cos(\alpha_1)} P_{випр} \quad (3)$$

де k_4 – константа.

Кількість енергії ехо-сигналу, пропорційна куту падіння α_2 в вертикальній площині, тому її можна виразити наступним чином:

$$\frac{P_{omp}}{P_{випр}} \sim \cos(\alpha_2) \text{ або } P_{omp}^{Pi3} = k_5 \cos(\alpha_2) P_{випр} \quad (4)$$

де k_5 – константа.

На кількість енергії також впливає температура різального інструменту, тому залежність можна виразити математичною функцією $f_1(T)$. Тоді модель виглядає наступним чином:

$$\frac{P_{omp}}{P_{випр}} \sim T \text{ або } P_{omp}^{Pi3} = f_1(T) P_{випр} \quad (5)$$

де T – температура інструменту, $f_1(T)$ – функція, що представляє вплив температури на отриману кількість енергії.

Тоді модель енергії, що відбивається від різальної кромки інструменту, можна представити наступним чином:

$$P_{omp}^{Pi3} = \left(k_3 S^2 \cdot k_4 \frac{1}{\cos(\alpha_1)} \cdot k_5 \cos(\alpha_2) \cdot f_1(T) \right) \cdot P_{випр} \quad (6)$$

Оскільки калібрувальна мітка – це плоска поверхня з кутом падіння ультразвукового пучка рівним 90° та її температура така сама, як і в різця, то її модель можна виразити так:

$$P_{omp}^{Mimku} = f_1(T) \cdot P_{випр} \quad (7)$$

Тоді порівнюючи кількість енергії ехо-сигналу отриманої від мітки та від ділянки зносу можна виразити аналітичну модель зносу різального інструменту:

$$\frac{P_{omp}^{Pi3}}{P_{omp}^{Mimku}} = k_3 S^2 \cdot k_4 \frac{1}{\cos(\alpha_1)} \cdot k_5 \cos(\alpha_2) \quad (8)$$

Розроблена математична модель (8) показує залежність кількості енергії ехо-сигналу від кута падіння пучка ультразвукових хвиль в горизонтальній та вертикальній площинах, та від площі зношеної ділянки. Порівнюючи кількість енергії поверненої від ділянки зносу та від мітки можна досить точно виміряти рівень зносу різального інструменту безпосередньо в процесі обробки.

Блок-схема (рис. 4) складається з таких елементів: п'єзоелектричний перетворювач 1, він генерує та зчитує звукові хвилі та встановлений в державку різального інструменту. Прийнятий сигнал підсилюється та фільтрується від шуму в блоці 2, після чого надходить на вхід аналогово-цифрового перетворювача 3. З АЦП цифровий сигнал надходить до електронно-обчислювальної машини 4, де оцінюється знос та швидкість зносу різального інструменту та порівнюється з базою даних 5, яка містить інформацію про критичний та допустимий рівень зносу для даного інструменту. Після оцінки ЕОМ посилає сигнал про стан різального інструменту в блок 6, в якому відбувається коригування режиму різання. Після коригування інформація подається на блок керування 7, який формує керуючі сигнали. Ці сигнали записуються в програму верстату з ЧПК 8. Тоді програма надсилає їх на виконавчі механізми верстату 9.

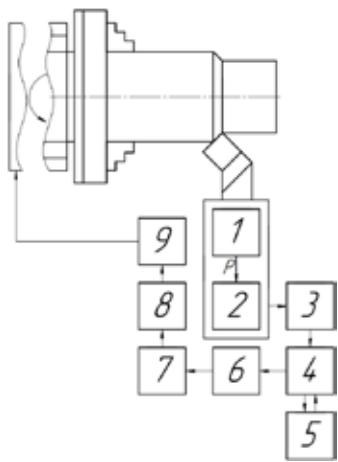


Рис. 4. Блок-схема системи контролю зносу різального інструменту

Висновки.

1. Проведений аналіз методів контролю параметру шорсткості показав, що оптичні методи є оптимальним вибором, оскільки забезпечують високу роздільну здатність, безперервність сигналу та високу швидкість проведення вимірювань. Тому було обрано метод конфокального хроматичного зондування.

2. Аналіз методів діагностики зносу різального інструменту в процесі обробки показав, що використання непрямих методів зазвичай потребує зміни конструкції верстату, що призводить до зменшення жорсткості системи верстату. Тому було обрано метод ультразвукової діагностики.

3. Розроблена математична модель, що заснована на методі ультразвукового контролю, яка дозволяє оцінювати рівень розмірного зносу різального інструменту в процесі обробки.

4. На основі математичної моделі розроблена система контролю стану та рівня зносу різального інструменту в процесі обробки для верстатів з ЧПК, яка не потребує складної зміни конструкції верстату та дозволяє проводити вимірювання при будь яких режимах обробки.

5. Розроблена система контролю якості поверхні, а саме геометричного параметру шорсткості поверхні (Ra , Rz) деталей, з використанням безконтактного методу хроматичного конфокального зондування, з проведенням вимірювань на містці, що дозволить зменшити кількість похибок, що вносяться при повторній установці деталі.

6. Розроблена блок-схема комплексної системи контролю процесу обробки деталей в умовах автоматизованого виробництва. Дана система дозволить підвищити точність та надійність процесу обробки деталей приладів на верстатах з ЧПК, зменшити кількість бракованих деталей, що дасть змогу збільшити продуктивність роботи та знизити собівартість автоматизованого виробництва. Також система може бути використана для дослідження залежності параметрів шорсткості поверхні від розмірного зносу різального інструменту та знаходження оптимальних режимів обробки.

Список літератури:

1. Остаф'єв В.А., Тимчик Г.С., Шевченко В.В. Адаптивна система управління. Механізація і автоматизація управління. Київ, 1983. С. 18–20.
2. Grohmann C. H., Hargitai H. Surface Roughness. Encyclopedia of Planetary Landforms. New York, NY, 2014. С. 1–4. URL: https://doi.org/10.1007/978-1-4614-9213-9_633-1 (дата звернення: 15.03.2023)
3. How to solve quality problems by advanced fully-automated manufacturing systems / M. J. R. Costa та ін. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2017. Т. 94, № 9–12. С. 3041–3063. URL: <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0158-8> (дата звернення: 17.03.2023).
4. Davim J. P., Markopoulos A. P., Markopoulos A. Advanced Machining Processes: Innovative Modeling Techniques. Taylor & Francis Group, 2017. 327 с.

5. Review of measurement methods for areal surface roughness / HE Bao-feng та ін. Optics and Precision Engineering. 2019. Т. 27, № 1. С. 78–93. URL: <https://doi.org/10.3788/ope.20192701.0078> (дата звернення: 15.03.2023).
6. Jia Z., Hu Z. Evaluation methods of material surface macro-roughness. Materials Research Innovations. 2015. Т. 19, sup8. С. S8–293–S8–296. URL: <https://doi.org/10.1179/1432891715z.0000000001682> (дата звернення: 15.03.2023).
7. Yandayan T., Burdekin M. In-process dimensional measurement and control of workpiece accuracy. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 1997. Vol. 37, no. 10. С. 1423–1439. URL: [https://doi.org/10.1016/s0890-6955\(97\)00019-9](https://doi.org/10.1016/s0890-6955(97)00019-9) (дата звернення: 15.03.2023).
8. Quinsat Y., Tournier C. In situ non-contact measurements of surface roughness. Precision Engineering. 2012. Т. 36, № 1. С. 97–103. URL: <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2011.07.011> (дата звернення: 15.03.2023).
9. Chromatic Confocal Sensor Vs. Laser Displacement Sensor. Chromatic Confocal Sensor Manufacturer. URL: <https://www.geramtech.com/chromatic-confocal-sensor-advantages/> (дата звернення: 15.03.2023).
10. Шевченко В.В., Коробцов, С.І., Богачев Є.В., Заєць С.С. Система діагностики працездатності різального інструменту на верстатах з ЧПК.// Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2018. Том 29 (68), № 2. С. 198–202.
11. Abu-Zahra N. H., Nayfeh T. H. Calibrated method for ultrasonic on-line monitoring of gradual wear during turning operations. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 1997. Т. 37, № 10. С. 1475–1484. URL: [https://doi.org/10.1016/s0890-6955\(96\)00091-0](https://doi.org/10.1016/s0890-6955(96)00091-0) (дата звернення: 18.03.2023)

Melnychuk B.P., Shevchenko V.V. A COMPLEX SYSTEM OF CONTROL OF THE PROCESSING OF DEVICE PARTS IN AUTOMATED PRODUCTION

The article presents a complex system of control of the processing of device parts in automated production, a mathematical model of cutting tool wear, and a block diagram for measuring tool wear in real time.

The complex system of control consists of two parts. The first part is a system for monitoring the level of linear wear of a cutting tool in real time based on ultrasonic diagnostics of the cutting tool. This method will allow you to measure the level of wear, as well as to diagnose the cutting tool in real time on machines with computer numeric control. The measurement accuracy of the ultrasonic method, namely the time of the ultrasonic wave in the tool body, is 1 ns, and the wear measurement error is 2 microns.

The second part is a surface quality control system, namely the geometric roughness parameter (R_a , R_z). Measurements are made using the non-contact chromatic confocal sensing method. This method allows to take measurements in-situ, which reduces the number of errors introduced when the part is reinstalled. The error of this method is 5% compared to contact methods. The optical method of confocal sensing allows you to accurately measure the surface roughness with a parameter of R_a 0.2-0.7. The schematic diagram of the measurement using the confocal chromatic sensing method and the results of surface measurements under different processing conditions are presented.

For the first part of the complex system, a mathematical model was developed that shows the dependence of the level of linear wear of the cutting tool on the time of ultrasonic wave transmission in the tool body. A block diagram for measuring cutting tool wear was also developed.

The introduction of an complex system of control of the processing of device parts into production will improve the machining accuracy and surface quality of the part, which will reduce the number of defective parts and increase the productivity of automated production. The developed system can also be used to determine the dependence of the part surface roughness parameters on the level of cutting tool wear.

Key words: roughness parameters, surface quality of device parts, wear of cutting tools, ultrasound diagnostics, chromatic confocal sensing, automated production.

УДК 629.7

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.2.1/32>

Муравйов О.В.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Довбиш І.О.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Галаган Р.М.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Богдан Г.А.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Момот А.С.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ПІДВИЩЕННЯ РІВНЯ АВТОНОМНОСТІ БПЛА

На сьогоднішній день безпілотні літальні апарати виконують безліч функцій: від світлових шоу до детального аналізу орних земель та пошуку злочинців. Вони не тільки привидишують процес збирання даних, а й здатні самостійно виконувати деякі задачі, які можуть бути складними або навіть небезпечними для людини. Розвиток цих технологій є однією з провідних сфер сучасного світу, адже з кожним днем перед БПЛА постають нові, складніші завдання. Для їх вирішення використовують різноманітні системи та пристрої, елементи машинного навчання. У певних ситуаціях, з якими не може впоратися один дрон, використовують рої БПЛА.

Стаття містить аналіз та короткий опис сучасних технологій, що можуть підвищити ефективність та автономність БПЛА. До них, зокрема, відносяться супутникові та інерціальні навігаційні системи, методи пасивної оптичної орієнтації із застосуванням штучного інтелекту на основі комп'ютерного зору, інфрачервоні та мультиспектральні камери, датчики вимірювання відстані до об'єктів. У роботі розглянуті сфери використання останніх та найбільш перспективних технологій БПЛА. Особливу увагу приділено об'єднанню БПЛА в рої, актуальним проблемам та сучасному стану розвитку цієї технології. Проаналізовано сучасні шляхи вирішення проблеми «паливо-вага-відстань».

У роботі розглянуті методи автоматизованої обробки зображень на основі сегментації даних, що застосовуються у сучасних БПЛА для розпізнавання та класифікації об'єктів. Проаналізовані основи технологій агрономіторингу із застосуванням дронів, що базуються на використанні мультиспектральних камер, визначенні вегетаційних та індексів рослинності. Розглянуто технологію побудови тривимірних кольорових моделей місцевості, що реалізована та впроваджена однією з українських компаній на основі датчиків LiDAR.

Розвиток БПЛА вже досяг неабияких вершин, проте досі актуальним є питання створення повністю автономного дрона, що може самостійно використовувати інформацію, отриману від наявного корисного навантаження. Потребують значного вдосконалення алгоритми взаємодії між самостійними дронами в складі рою.

Ключові слова: безпілотні літальні апарати, БПЛА, дрони, автономність, корисне навантаження, навігаційні системи.

Постановка проблеми. Ідея створення «безпілотника» з'явилась наприкінці 19 ст. III всіляко намагалися втілити у життя під час Першої та Дру-

гої світових війн. У 1970-х роках почалися перші випробування НАСА безпілотних літальних апаратів на великих висотах. У той час ці технології не

привертати до себе багато уваги, адже були недостатньо функціональними і потребували великих фінансових вкладень. У наші дні БпЛА виконують більшість завдань швидше та економічно вигідніше за альтернативні методи. Часто вони рятують життя людей. Не останнє місце у розвитку таких технологій займає й Україна. Сьогодні вони використовуються у сільському господарстві, електроенергетиці, геодезії, нафтогазовій та гірській промисловості, будівництві, військовій техніці і т. д. Проте ці технології наразі активно розвиваються, вдосконалюються, сфери їх застосування постійно розширюються і залишається ще чимало невирішених питань, що потребують додаткових досліджень та доопрацювання. За думкою міністра цифрової трансформації України Михайла Федорова розробка і виробництво БпЛА є одним з пріоритетних напрямків розвитку нашої держави.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні безпілотні літальні апарати повинні вміти аналізувати навколишній світ, будувати маршрут свого руху та алгоритм виконання певних дій. Все це буде неможливим для БпЛА без забезпечення засобами орієнтації в просторі. Для цього використовують поєднання супутникових та інерціальних навігаційних систем [1, с. 79–84]. Разом ці засоби дозволяють створити досить точну автономну систему орієнтації дрона.

Аналіз сучасного ринку демонструє, що для кожної зі сфер застосування БпЛА є свої варіанти вирішення поставлених задач та компоновки структурної схеми дрона. Матеріали з джерел [2, 3] містять інформацію, як системи комп'ютерного зору використовуються у будівництві, сільському господарстві та для збереження безпеки.

Цікавими є описи можливостей вже розроблених новітніх систем БпЛА. Наприклад, станції Menatir українського виробництва, про які зазначено у матеріалі [4], використовують для своїх дронів мультиспектральні камери, що здатні швидко і якісно аналізувати стан рослинності і надавати необхідну інформацію замовнику з аграрного сектора.

Також до прикладів сучасних дронів можна віднести Raybird-3 компанії Skyeton [5]. Серед його особливих можливостей є створення досить точної тривимірної карти місцевості, що реалізується на основі застосування датчиків LiDAR.

З метою вирішення більш складних, комплексних та масштабніших задач дрони поєднують у групи (рої). Схеми взаємодії між БпЛА у рою, що застосовуються сьогодні, описані в роботі [6, р. 0904–0905].

Формулювання цілей статті. Метою роботи є дослідження сучасних технологій БпЛА, виявлення перспективних напрямків розвитку та сфер застосування даної техніки, в тому числі для України, визначення актуальних проблем, що постають перед розробниками дронів, та пошук шляхів їх вирішення, а також аналіз систем та пристроїв, що використовуються сьогодні для забезпечення автономності БпЛА.

Виклад основного матеріалу. «Серцем» будь-якого безпілотного літального апарату є контролер польоту. Саме він відповідає за збереження рівноваги, керує подачею палива, утриманням заданої висоти, передачею даних у режимі реального часу. До контролеру польоту під'єднуються усі системи, що забезпечують режим автономної роботи БпЛА. Процес прийняття рішень та аналіз даних також відбувається у даному контролері.

Навігаційні системи. Існує три основні категорії навігаційних систем для БпЛА, що дозволяють встановити його місцезнаходження в певний момент часу: інерціальні навігаційні системи, глобальні навігаційні супутникові системи та навігаційні системи на основі комп'ютерного зору.

Інерціальна навігаційна система (ІНС) є самостійним вузлом і може містити гіроскопи, акселерометри та обчислювальні пристрої, що не потребують надходження додаткових даних з навколишнього середовища чи інших джерел. Система дозволяє досить точно визначити лінійне прискорення БпЛА за трьома координатними осями, його куту орієнтацію та координати місцезнаходження. Уся ця інформація оновлюється і передається з частотою до 100 Гц, що є важливим для літального апарату, який перебуває у постійному русі. Проте відсутність взаємодії з навколишнім середовищем має і негативні наслідки. Головним з них є те, що похибки даних ІНС з часом зростають. Для усунення цієї проблеми необхідною є періодична корекція координат. Також ІНС потребує обов'язкового налаштування на початку використання БпЛА.

Сьогодні для створення ІНС застосовують МЕМС (мікроелектромеханічні технології). Вони поєднують у своїй будові механічні частини (чутливі елементи) та датчики, що реагують на будь-які зміни параметрів чутливого елемента. Є декілька вагомих причин для їх використання. По-перше, такі системи є більш компактними, легкими та точними, що відіграє важливу роль при конструюванні БпЛА. По-друге, вони є економічно більш вигідними, адже мають налагоджене виробництво, можуть виготовлятися з різних матеріалів, використовуючи різні технології.

До супутникових навігаційних систем, що використовуються у БПЛА, відносяться загальновідомі системи GPS, ГЛОНАСС та Galileo. Всі вони працюють за однаковим принципом: на дрон встановлюється відповідний приймач, що самостійно обчислює власне місцезнаходження шляхом опрацювання сигналів, отриманих від супутників відповідної системи. Одразу можна сказати про один, досить вагомий, недолік цієї системи: для визначення місця перебування потрібен безперебійний сигнал, який досить важко забезпечити та легко навмисно заглушити. Відсутність сигналу навіть на відносно невелику тривалість часу може призвести до повної втрати орієнтації БПЛА. До слабких сторін супутникової навігаційної системи також відносяться недостатня точність та низька швидкість відновлення інформації (частота оновлення даних близько 10 Гц).

На відміну від інерціальних, у супутникових навігаційних системах не спостерігається тенденція зростання значення похибок з плином часу. Таким чином, поєднуючи два описаних вище типи систем, є можливість отримати вичерпну інформації про місцезнаходження БПЛА у повітрі, яка не потребуватиме додаткових коригувань ззовні та зможе з прийнятною точністю працювати у разі короткочасної втрати супутникового сигналу.

Дві зазначені навігаційні системи можуть поєднуватися по-різному. Одним із найпоширеніших варіантів зв'язку є незалежна робота двох систем, дані з яких оброблюються за допомогою фільтра Калмана [7], що виключає випадкові відхилення. Калібрування значень ІНС при цьому відбувається під час польоту БПЛА і не потребує додаткового втручання оператора.

Комп'ютерний зір. Навігаційні системи відповідають за визначення географічних координат розташування БПЛА, можуть забезпечити його автоматичне переміщення з однієї точки до іншої. Проте під час польоту часто трапляються непередбачувані перешкоди (птахи, дерева, будівлі тощо). Автономний БПЛА має розпізнавати їх, визначати їх розмір та оминати. Для вирішення цього завдання та задач з пошуку різних об'єктів (наприклад, людей чи рідкісних диких тварин) застосовують комп'ютерний зір.

Використання комп'ютерного зору має на увазі застосування технологій штучного інтелекту. Система отримує зображення від встановлених камер та має проаналізувати їх, керуючись алгоритмами та принципами, що були сформовані під час попереднього навчання. Також поширеними є наступні методи обробки отриманого зображення.

1. Сегментація – метод розподілу зображення на області за кольором, текстурою, яскравістю чи іншим критерієм однорідності в процесі аналізу пікселів. У результаті такої обробки об'єкти на зображенні мають чіткий контур [8, с. 83–84].

Методи сегментації зображень поділяють на семантичні та екземплярні. Семантична сегментація визначає клас певного об'єкта. Наприклад, дозволяє розпізнати людину, тварину певного виду чи рослину. Ця технологія широко використовується в агросекторі та при наукових дослідженнях. Екземплярна сегментація виділяє один об'єкт серед інших, присвоюючи йому унікальну мітку. Такий підхід може застосовуватись, наприклад, для пошуку злочинців та при спостереженні за конкретним об'єктом.

2. Обмежувальні рамки – метод обробки зображень, при застосуванні якого кожен розпізнаний об'єкт потрапляє в умовний прямокутник, що являє собою область зображення певного розміру. Дані рамки можуть бути прямокутної (2D) або кубоподібної (3D) форми, тобто, вони не повторюють форму об'єкта та не встановлюють його чітких контурів. Застосування таких рамок не потребує настільки детального аналізу зображення, як при сегментації, що обумовлює більш високу швидкість роботи цього алгоритму. Використання метода обмежувальних рамок також дозволяє проводити класифікацію об'єктів. Проте при наявності великої кількості елементів на зображенні даний підхід може працювати недостатньо коректно. Модифікацією метода обмежувальних рамок є використання полігональних фігур замість прямокутників, що вже більш чітко повторюють форму певного об'єкта.

Камери та датчики. Найбільшого поширення серед додаткових систем корисного навантаження набуло інтегрування в конструкцію БПЛА інфрачервоних (ІЧ) камер. Часто їх використовують для пошуку рідкісних тварин, забарвлення яких співпадає із навколишнім середовищем, спостереженням за епідеміологічною ситуацією, контролем за станом ліній електропередачі, наукових досліджень, військових задач.

Інфрачервоні камери перетворюють випромінювання ІЧ спектру у зображення, що здатне сприйняти людське око. Це також дозволяє аналізувати об'єкти, спираючись на різницю їх температури і фону. Для аналізу даних, отриманих від такої камери, в БПЛА застосовують методи комп'ютерного зору, що дає можливість автоматично реагувати на певний рівень інтенсивності сигналу на зображенні (відповідно до заданого порогу температури) [9, с. 112]. Напри-

клад, при аналізі епідеміологічної ситуації дрон може виявляти людей, температура тіла яких перевищує певну норму.

ІЧ камера є корисною і для пошуку об'єктів, що розташовані за певними типами перешкод, які створюють заваду у видимому діапазоні довжин хвиль (дим, туман, рослинність). Таким чином, є можливість, наприклад, знайти потрібну тварину між кронами дерев, у той час як побачити її неозброєним оком буде дуже важко. Не є проблемою і відсутність сонячного або іншого джерела випромінювання. Це робить БПЛА з ІЧ камерою надзвичайно ефективним інструментом моніторингу та виявлення об'єктів саме вночі.

Останнім часом набули розповсюдження БПЛА з мультиспектральними камерами, що реєструють інтенсивність випромінювання одночасно у декількох діапазонах оптичного спектра. Такі системи знайшли застосування, наприклад, в аграрній сфері. На основі показників мультиспектральної камери є можливість розрахувати індекси вегетації рослин, найбільш відомими з яких є NDVI (нормалізований відносний вегетаційний індекс) та NDRE (нормалізований різницевий індекс червоного краю). Обидва індекси дозволяють оцінити стан здоров'я та густину рослинності на місцевості. Розрахунок NDVI базується на порівнянні інтенсивностей ІЧ та червоного світлових потоків. У випадку NDRE визначається співвідношення між ІЧ та випромінюванням у вузькому спектральному вікні, що знаходиться в області переходу від видимого червоного до ІЧ випромінювання (так звана «зона червоного краю»). Після проведених досліджень створюють карти розподілу значень цих індексів для подальшого аналізу територій.

Приклад застосування такої технології для моніторингу мангрових лісів острова Лотіан в Шотландії продемонстровано на рис. 1, де наведені карти розподілу значення NDVI для 2016 та 2018 років та результуюче зображення, що дозволяє оцінити тенденцію зміни стану здоров'я рослинності та визначити максимально проблемні ділянки [10, р. 278].

Подібний моніторинг дозволяє робити висновки про життєздатність рослин, виявляти ділянки, що потребують зрошення, лікування чи видалення бур'янів, прогнозувати урожайність. З використанням БПЛА такий аналіз проводиться набагато швидше та якісніше, особливо, якщо це стосується сільськогосподарських угідь великого розміру. Наприклад, мережі базових станцій Menatir (розробка української компанії Culver Aviation) по 6 БПЛА у кожній, дають можливість проводити подібний аналіз автоматизовано для 45000 га за добу [4].

Наступною задачею, що можна вирішити шляхом використання додаткових бортових датчиків в БПЛА, є визначення відстані до об'єкта. Для цього застосовують системи LiDAR (виявлення та визначення дальності за допомогою світла). Принцип їх роботи базується на використанні лазерів: система посилає лазерний імпульс та реєструє його після відбиття від поверхні об'єкта і, вимірюючи час проходження оптичного випромінювання до об'єкту і назад, визначає відстань до нього [11, с. 38].

Датчик LiDAR застосовує короткі лазерні імпульси для визначення точного місцезнаходження кожної точки поверхні навколишніх об'єктів. Для цього він аналізує три величини: час, який витрачено на повернення імпульсу, інтенсивність отриманого імпульсу та кут

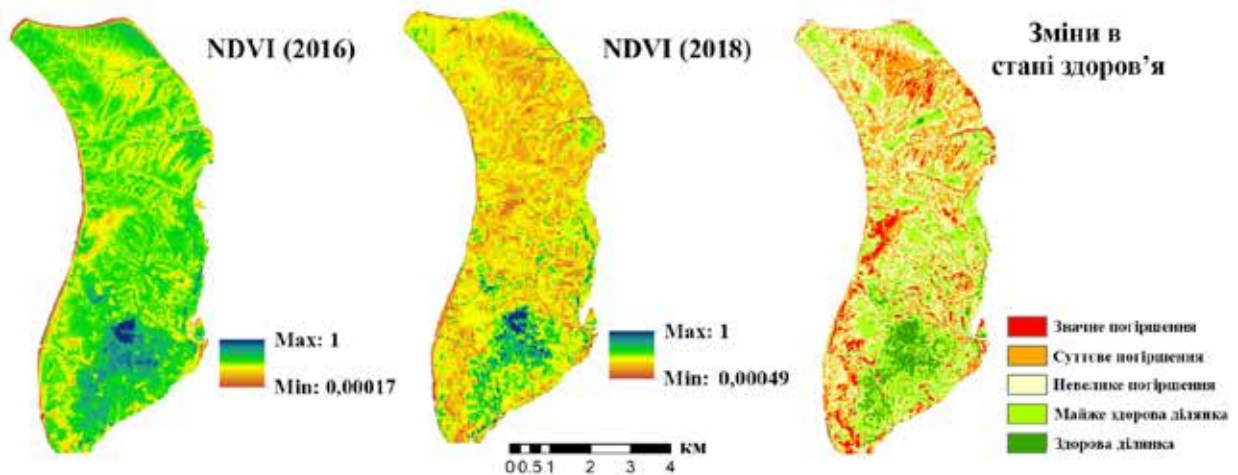


Рис. 1. Оцінка зміни стану здоров'я ділянки мангрових лісів на основі NDVI

його відбиття. На основі отриманої інформації є можливість сформувати об'ємну карту проаналізованого навколишнього простору. Отримані 3D-моделі можуть використовувати як БПЛА (для побудови оптимального маршруту), так і людина-оператор. При поєднанні LiDAR з камерами видимого діапазону спектра або ІЧ випромінювання стає можливим створення тривимірної кольорової карти місцевості. Датчик LiDAR не потребує освітлення, тому ефективність його використання вночі не знижується. На сьогоднішній день прикладами сфер використання БПЛА з такими бортовими датчиками є лісництво, сільське господарство, картографія, добування корисних копалин та робота правоохоронних органів.

Прикладом українського дрону, що здатен створювати високоточні 3D-моделі місцевості, є Raybird-3, виготовлений компанією Skyeton. Зображення такої моделі, наведені на сайті виробника [5], демонструють високу точність отриманих результатів (рис. 2).

Ройове використання. Потужностей одного БПЛА може не вистачати для виконання певних завдань. Прикладами таких задач є аналіз великої території, моніторинг руху транспорту у місті, транспортування та пошук об'єктів тощо. В даних випадках використовують групу БПЛА, яку називають роєм. Тип взаємодії між БПЛА залежить від рівня їх автономності.

Розглядаючи світлові шоу з використанням роїв БПЛА або будь-які завдання, де рух має відбуватися згідно чітко визначеного маршруту, варто говорити про найнижчий рівень автономності. У цих випадках кожен дрон отримує інформацію лише від центра управління і виконує заздалегідь запрограмовані дії. Кількість сфер подібного при-

мітивного застосування роїв БПЛА дуже обмежена та носить скоріше розважальних характер.

Наступною сходинкою є отримання БПЛА даних з навколишнього середовища, які надсилаються до центру управління, де аналізується отримана інформація та визначається взаємне розташування кожної одиниці рою та формуються подальші команди керування. Головним недоліком цього підходу є залежність від центру управління: у разі його втрати чи порушення каналу зв'язку втраченим буде увесь рій.

Рій з повністю автономними БПЛА не має єдиного центру прийняття рішень чи аналізу інформації. Кожен дрон є самостійним та опирається на інформацію, що отримує зі свого власного корисного навантаження (камер та датчиків). Взаємодія літаючих апаратів відбувається шляхом передачі між ними отриманих з навколишнього середовища даних. Причому дрон ділиться нею лише з сусідніми БПЛА, а не з роєм загалом. Це реалізовано з метою збереження енергоресурсів та зниження вимог до бортового обладнання БПЛА.

Основними задачами рою на сьогодні є контроль за взаєморозташуванням дронів та оптимізація виконання поставлених задач. Основу механізму рою взято з природи. Найяскравішими прикладами є мурашиний алгоритм та алгоритм рою бджіл [6, р. 0904]. При знаходженні цілі, дрон вказує на неї іншим учасникам рою. У процесі аналізу БПЛА обирає або рухатися до найближчої цілі, або до найбільшої в залежності від обраного розробниками алгоритму.

Проблема «паливо-вага-відстань». Основною метою, що переслідується про розробці будь-якого БПЛА є вирішення проблеми співвідношення палива, ваги та відстані. Ідеальним варіантом є роз-



Рис. 2. 3D-модель місцевості, побудована на основі даних з БПЛА Raybird-3

робка системи дрона, який мав би усе необхідне корисне навантаження, невелику масу (включаючи паливо) і міг би долати великі відстані.

Першим, на що необхідно звернути увагу при проектуванні БпЛА, є економія палива чи ресурсу джерела живлення. Для цього в БпЛА використовують системи вертикального зльоту та посадки, що є менш енерговитратними. Також максимально зменшують розміри, вагу усіх компонентів конструкції дрона. Чим менша маса, тим менше потужності двигуна потрібно для переміщення апарату, а отже, й менше необхідного запасу джерела живлення. Наприклад, зменшення ваги є однією з причин, що обумовила застосування МЕМС технологій в інерціальних навігаційних системах. Крім того, з цією ж метою максимально зменшують кількість корисного навантаження, використовуючи найефективніші прилади, що дозволяють вирішувати різноманітні задачі.

Найбільш поширеним типом джерела живлення для БпЛА на сьогоднішній день є літій-полімерна (LiPo) батарея, яка забезпечує високу щільність енергії і здатна підтримувати досить тривалі польоти. Інші джерела енергії включають паливні елементи, сонячні батареї та гібридні системи. Гібридні системи об'єднують два або більше типів джерел енергії для підвищення енергоефективності системи.

Одним зі шляхів вирішення проблеми «паливо-вага-відстань» стало використання гібридних систем [12]. Їх безумовною перевагою є не тільки збільшення часу польоту, а й швидкість оновлення ресурсів. Принцип їх роботи полягає у перетворенні хімічної енергії палива в механічну, а далі – в електричну. Простіше кажучи, двигун внутрішнього згорання працює як генератор електроенергії, що приводить компоненти дрону до руху. Особливого поширення набули газоелектричні гібридні паливні системи, що на сьогодні можуть утримувати БпЛА у повітрі до 48 годин.

Інноваційним є використання у гібридних системах для БпЛА водневих двигунів. Вони використовують хімічну енергію, що виділяється

в процесі реакції між воднем та киснем (вихідним продуктом є вода). Такі двигуни дозволяють в рази збільшити дальність польоту та час перебування дрону в повітрі. Вони є легшими за інші системи та менше шкодять навколишньому середовищу. У якості палива в таких двигунах використовують як рідкий водень, так і водень, збережений під високим тиском.

Висновки. У сучасному світі реальною стала ідея створення повністю автономного БпЛА. Для досягнення цієї мети використовують технології штучного інтелекту та комп'ютерного зору, що обумовлюють необхідність встановлення додаткового корисного навантаження. Суттєво підвищити точність позиціонування БпЛА, рівень його автономності та завадозахищеності дозволяють інтегровані інерціально-спутникові навігаційні системи та технології пасивної оптичної орієнтації.

Однією з найперспективніших сфер застосування дронів для України, як аграрної держави з давніми традиціями землеробства, є моніторинг стану здоров'я рослинності та прогнозування урожайності земель сільськогосподарського призначення. Технологія базується на мультиспектральному скануванні та визначенні індексу вегетації.

Для виконання масштабних робіт використовують рої дронів. Модель їх взаємодії залежить від рівня автономності БпЛА. Пріоритетним напрямком розвитку даної технології є створення повністю самостійних роїв, що не потребують додаткових інструкцій від оператора в ході виконання поставлених задач. Налагодження комунікації між БпЛА зі штучним інтелектом наразі знаходиться в процесі розробки, але є кілька алгоритмів, що вже успішно використовуються.

Проблема співвідношення палива, ваги та відстані, напевно, завжди буде актуальною для БпЛА. На сьогоднішній день для подовження часу перебування дрону в повітрі та збільшення радіусу його дії найбільш перспективними є технології гібридних паливних систем та водневі двигуни. Гібридні двигуни є легкими, більш ефективними за традиційні акумулятори і потребують менше часу для заправлення.

Список літератури:

1. Захарін Ф.М., Пономаренко С.О., Ковтун В.І. Сучасні тенденції розвитку інтегрованих інерціально-спутникових навігаційних систем літальних апаратів. *Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту авіації*. 2013. № 9 (16). С. 77–85.
2. Your Guide to Computer Vision in Drone Technology. URL: <https://keymakr.com/blog/computer-vision-in-drone-technology> (дата звернення: 27.03.2023).
3. Computer vision in AI drones. URL: <https://www.superannotate.com/blog/computer-vision-in-ai-drones> (дата звернення: 27.03.2023).

4. Автоматизований дистанційний моніторинг: як система Menatir допомагає бізнесу ухвалювати зважені управлінські рішення. URL: <https://culver.aero/articles/how-menatir-system-helps-businesses-make-informed-management-decisions> (дата звернення: 27.03.2023).
5. Skyeton. Сфери застосування. URL: <https://skyeton.com/komertsiyne-vikoristannya> (дата звернення: 27.03.2023).
6. Campion M., Ranganathan P., Faruque S. A review and future directions of UAV swarm communication architectures. *Proc. IEEE Int. Conf. Electro/Inf. Technol. (EIT)*. May 2018. pp. 0903–0908.
7. Hematulin W., Kamsing P., Torteeka P., Somjit T, Phisannupawong T., Jarawan T. Trajectory planning for multiple UAVs and hierarchical collision avoidance based on nonlinear Kalman filters. *Drones*. 2023. № 7. 142.
8. Сторожик Д.В., Муравйов О.В., Протасов А.Г., Баженов В.Г., Богдан Г.А. Комплексування мульти-спектральних зображень як метод підвищення їх інформативності при бінарній сегментації. *KPI Science News*. 2020. № 2. С. 82–87.
9. Живкович А.В., Муравьёв А.В. Современные технологии бесконтактного измерения температуры. *Materialy XVI Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji «Dynamika naukowych badań - 2020»*. 2020. Vol. 7, С. 110–115.
10. Jyoti Prakash Hati et al. Mangrove classification using airborne hyperspectral AVIRIS-NG and comparing with other spaceborne hyperspectral and multispectral data. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*. 2021. Vol. 24, Issue 2. pp. 273–281.
11. Морозов М.А., Муравьёв А.В. Современная лазерная дальнометрия *Новые направления развития приборостроения: материалы 9-й международной научно-технической конференции молодых ученых и студентов*. 2016. 38 с.
12. Hybrid Drones, UAV, UAS. URL: <https://www.unmannedsystemstechnology.com/expo/hybrid-drones> (дата звернення: 27.03.2023).

Muraviiov O.V., Dovbysh I.O., Galagan R.M., Bohdan H.A., Momot A.S. DEVELOPMENT PROSPECTS OF TECHNOLOGIES AND INCREASING AUTONOMY LEVEL OF UAV

Today unmanned aerial vehicles perform many functions: from light shows to detailed analysis of arable land and search for criminals. UAVs not only speed up data collection process, but they are also able to independently perform some tasks that may be difficult or even dangerous for people. Development of these technologies is one of the leading areas in modern world, because every day new, more difficult tasks are faced by UAVs. Various systems and devices, elements of machine learning are used to solve them. In certain situations that cannot be solved by a single drone, swarms of UAVs are used.

The article contains analysis and short description of modern technologies that can increase the efficiency and autonomy of UAVs. These include, in particular, satellite and inertial navigation systems, methods of passive optical orientation using artificial intelligence based on computer vision, infrared and multispectral cameras, sensors for measuring distance to objects. The paper considers areas of usage of latest and most promising UAV technologies. Particular attention is paid to the UAVs swarms, actual problems and current state of this technology development. Modern ways for solving "fuel-weight-distance" problem are analyzed.

Methods of automated image processing based on data segmentation, which are used in modern UAVs for object recognition and classification, are considered in the paper. The basics of agricultural drones monitoring technologies, based on usage of multispectral cameras, determination of vegetation indices, are analyzed. The technology for building of three-dimensional color terrain models, which was designed and implemented by one of the Ukrainian companies, based on LiDAR sensors, is considered.

The development of UAVs already achieved extraordinary results, but issue of creating a fully autonomous drone that can independently use information obtained from the available payload is still relevant. Interaction algorithms between independent drones in a swarm require significant improvement.

Key words: *unmanned aerial vehicles, UAVs, drones, autonomy, payload, navigation systems.*

UDC 681.518

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.2.1/33>

Nevliudov I.Sh.

Kharkiv National University of Radio Electronics

Yevsieiev V.V.

Kharkiv National University of Radio Electronics

Demska N.P.

Kharkiv National University of Radio Electronics

Kostrova H.Yu.

Kharkiv National University of Radio Electronics

DEVELOPMENT AND IMPROVEMENT OF THE DESIGN OF A LIGHTWEIGHT MOBILE ROBOT MANIPULATOR USING GENERATIVE DESIGN

This paper is devoted to the study of the possibility of minimizing the mass of an on-board manipulator for a mobile robot without losing structural strength. The analysis of publications showed that the solution of this task will allow to increase the mass of the payload, therefore it will allow to significantly increase the time of autonomous operation. Which, accordingly, will allow solving more complex manipulation tasks in areas of increased danger or man-made disasters. To solve the task, the authors developed a kinematic scheme and a movement mechanism of a 5-axis mobile manipulator; performed an analysis and selected stepper motors as the drivers. The rationale for this choice is to increase the positioning accuracy of the gripping mechanism, which will allow for more accurate operations of moving objects. Using the Autodesk Fusion 360 design environment, 3D models of the structural elements of the mobile manipulator were developed, assembly was carried out, and weight and strength parameters were investigated. The total weight of the manipulator was 1060g, under the conditions that the material to preserve the strength parameters will be sheet metal with a thickness of 5mm. Using the approach to generative design, the authors improved all structural elements and conducted a series of simulations in the Simulation: Shape Optimization plugin. The results of the typological analysis of each link of the developed mobile manipulator showed the possibility of reducing the mass of each part by ~30-40%, depending on its design features, without losing strength parameters. As a result of improving the designs of the mobile manipulator using the generative design method, it was possible to reduce the total weight from 1060g to 601g, that is, the weight of the manipulator decreased by 41.5%. The authors hope that in the future, the conducted research will allow to reduce the consumption of materials and the time of manufacturing structural elements without loss of strength parameters when using additive technologies (3D printing by the FDM method), and therefore to increase the autonomous operation time of the mobile manipulative robot.

Key words: mobile robots, manipulators, kinematic scheme, design, generative design, modeling, Autodesk Fusion 360.

Formulation of the problem. The problem of research in the field of autonomous mobile manipulation robots is the need to develop and improve not only control algorithms, but also design features that will ensure effective autonomous functioning of robots in various conditions. To achieve this, it is necessary to reduce the mass of the robot, to increase the payload, but at the same time it is necessary to preserve the strong characteristics of the structures in order to perform the tasks [1].

Analysis of recent research and publications. The development and improvement of manipulator

structures for mobile robots has a number of advantages and is necessary to achieve the following goals [2-4]:

- increased robot mobility: Robots equipped with manipulators can perform more complex tasks, such as collecting, moving or manipulating objects inside and outside the building. An improved manipulator can provide greater mobility of the work, which will allow it to work in more diverse conditions and perform tasks that were previously unavailable.

- improved accuracy and efficiency: Manipulators designed with robustness and mobility requirements

in mind can provide greater accuracy and efficiency when performing tasks. This can be especially important for robots operating in complex and hazardous environments where precision and efficiency can be critical.

– reduction of production cost: Development and improvement of manipulator designs can help reduce the cost of manufacturing robots. An improved and more compact design can reduce the amount of required materials and components, which will reduce the cost of production.

– improved safety: Manipulators designed with robustness and mobility requirements in mind can be safer to use. The improved design can ensure more stable operation of the machine, reduce the probability of errors and increase the safety of others.

Shantanu Thakar analyzed the constructions of mobile manipulators, developed a classification, and developed a calculation methodology [5]. The authors suggest using classical approaches to designing structures and calculating the reliability of the manipulator, which leads to increased mass of the manipulator, which is negative for mobile robots, as it reduces the payload. Charles C. Kemp proposed a new manipulator design that, according to the author, reduces size, weight, and cost while supporting multiple tasks. The main structure consists of a two-wheeled mobile base with a differential drive, a lift and a telescopic boom configured to achieve Cartesian motion at the end of the manipulator [6]. Analyzing the publications, one can see that the authors propose to use the principle of a telescopic boom to simplify constructions. This makes it possible to reduce the total weight of the manipulator, while the authors do not conduct research on strength analysis, while controlling such a manipulator requires additional hardware modules, which increases the mass and reduces the payload of the mobile robot. Zhenshan Bing's research in the field of autonomous mobile manipulation is aimed at developing mobile robotic systems with manipulation capabilities that enable them to perform complex tasks in dynamic, unstructured, and field environments that require task-adapted design, control, and new application methods [7]. The authors propose to use biological and traditional methods of designing manipulation systems, which will allow to propose new approaches to the development of structures. But the proposed approaches have a theoretical and methodological basis for research, and not design recommendations for their use. Ferdinando Vitolo proposes a method of integrating mobile robots with manipulators for their use as collaborative robots [8]. As part of the

study, the authors developed a general mechatronic manipulator interface, while conducting the analysis, it is possible to see that the proposed solution is suitable for standard industrial manipulators, and cannot be applied to flexible mobile robots.

As you can see, research on the development of new designs of manipulators for mobile robots is an urgent task, which allows to increase the efficiency and autonomy of mobile robots by reducing the mass of the manipulator, without losing strength parameters.

The purpose of the article – development and improvement of structures of a lightweight manipulator of a mobile robot without losing its strength indicators using generative design.

Presenting main material. Generative design (GD) is an optimization method that uses algorithmic models to optimize material layout within a user-defined space for a given set of loads, conditions, and constraints. Topological optimization maximizes the performance and efficiency of the structure by removing excess material from areas that do not have significant loads [9].

GD shape optimization usually occurs at the end of the design process, when the desired part must be lighter or use fewer materials. Next, the designer detects certain preset parameters. Structural shape optimization first determines the minimum allowable design space required to optimize the shape of the product. Next, the software applies pressure to the project from various angles, checks its structural integrity and identifies unnecessary material. Design validation involves defining a threshold for the element's density field between a value between 0 and 1. A value of 0 cancels the material in the specified area of the structure, while a value of 1 defines the designated area as solid material. The designer can then remove all unnecessary material from the model and complete the topology optimization.

The calculation process consists of three main parts; input data, generative design algorithm and production data generation. The inputs to the generative design algorithm are available material, design goals, and rules. The generative design algorithm consists of material classification and a design cycle that repeats the following stages: search algorithm, shape search, and selection. The last step starts the next iteration of the design cycle. The result of the algorithm is a set of possible solutions. Data for production are generated for the selected solution [10-12].

The created kinematic chain (KC) of the future manipulator (Fig. 1) consists of 4 links and a working body (WB). The characteristics of the rotary axes of the manipulator robot are described in Table 1.

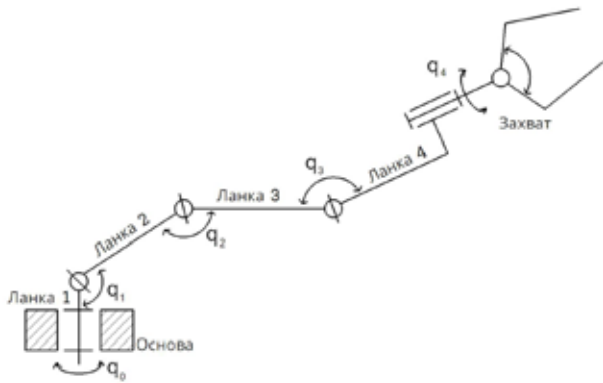


Fig. 1. Kinematic scheme and mechanisms of movement of the 5-axis designed manipulator

When forming the initial link, a diameter of 185 mm was chosen, and the thickness of the sheet metal was 5 mm (Fig. 2).

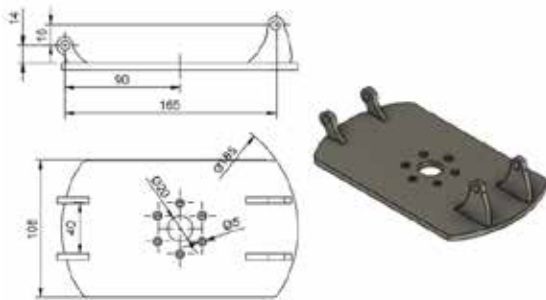


Fig. 2. Dimensions of the initial link

The schematic diagram (Fig. 3) shows the placement of manipulator objects and their attachment to the mobile platform.

The designed link is presented in fig. 4, its length along the attachment points is 420 mm, which fully meets the requirements.

In fig. 5 shows what the link and linear actuator will look like in the assembled state, fixed on the platform.

The next steps are the creation of two more links (3rd and 4th) and four auxiliary elements (Fig. 6, 7).

The design of the created manipulator distributes the load between two symmetrical (except for link 4) links and thus it is possible to achieve a greater potential load than is perceived.

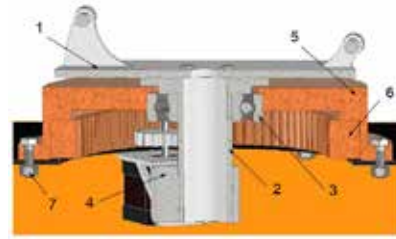


Fig. 3. Schematic diagram of the connection of the base and the initial link

1 – initial link; 2 – rotation shaft; 3 – bearing; 4 – engine with mount; 5 – base body; 6 – toothed insert; 7 – fixing the base

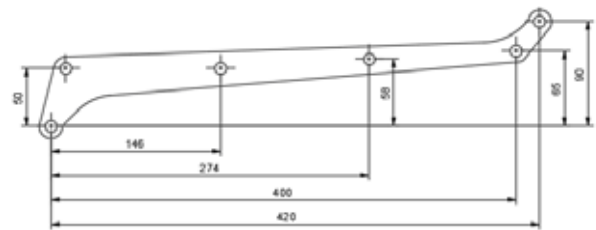


Fig. 4. Position and dimensions of the fastening holes of the 2nd link

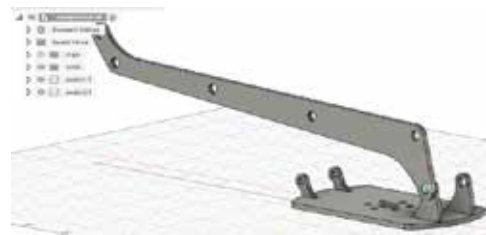


Fig. 5. Position and dimensions of the fastening holes of the 2nd link

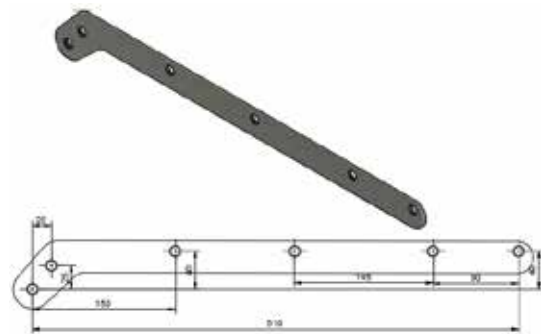


Fig. 6. Location and dimensions of the 3rd link mounting holes

Table 1

Characteristics of rotary axes of the manipulator robot

Rotary axis	Limits (degrees) – relative to the base position		Stepper motor (typical size, torque (N·m))	Torque at the output (N·m)
	Min.	Max.		
Axis q_0	-360	360	Nema 24, 3 N·m	20,25 N·m
Axis q_1	-110	110	Nema 24, 3 N·m	45 N·m
Axis q_2	-140	140	Nema 23, 1,2 N·m	12 N·m
Axis q_3	-360	360	Nema 17, 0.5 N·m	3.75 N·m
Axis q_4	-360	360	Nema 17, 0.5 N·m	3 N·m

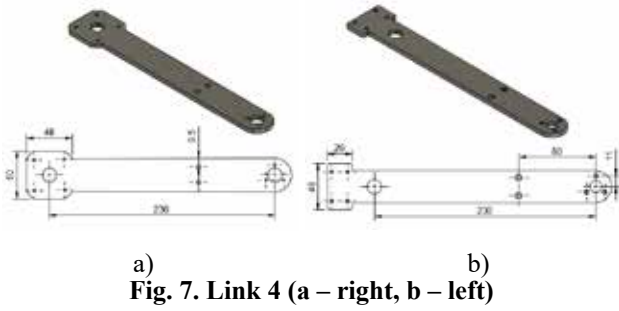


Fig. 7. Link 4 (a – right, b – left)

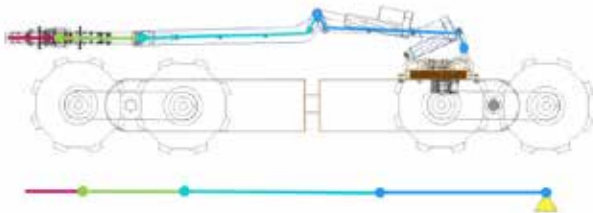


Fig. 8. The manipulator in an expanded form and a simplified diagram

In order to correctly load individual elements of the manipulator, you need to consider the option in an expanded form (Fig. 8).

Figure 10 shows that each link is clamped on one side, this is done with the expectation that there will be no random movements in the joints. All links have a load in the middle, this is the load from the mass of the link itself, there are certain deviations from the real points of attachment and centers of mass, but for the sake of simpler calculation, exactly half the length was chosen.

The total weight of the mechanism is 1.2 kg, the load on one link is 6 N. It is necessary to take into account the maximum weight of the object of transportation, the task is set so that the manipulator must be able to lift and transport an object weighing 10N. The total load on the link will be $(12N+10)*0.5=11N$. Let's do a simulation in the Autodesk Fusion 360 environment [13].

We can observe the load diagram of the right part with a weight of 15N and the margin factor. The entire part is of the same color and has a margin of strength of 15 (Fig. 10), which shows the ability of the link to withstand the load.

The load on all subsequent links will be cumulative. If the output link No. 4 perceived a load of 15N,

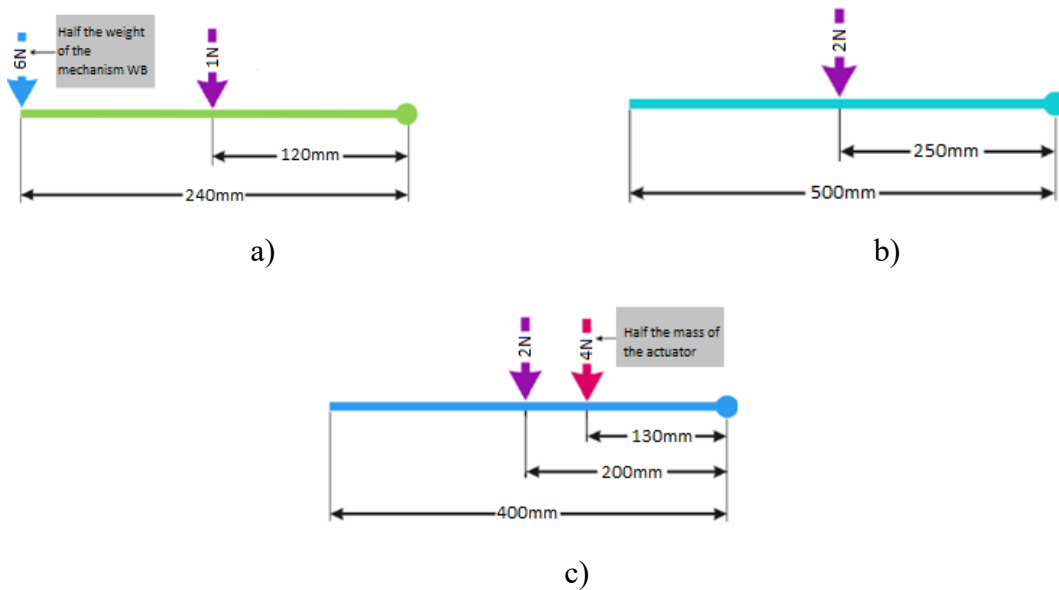


Fig. 9. Loads perceived by links independently of each other
a – load on the fourth link; b – load on the third link; c – load on the second link

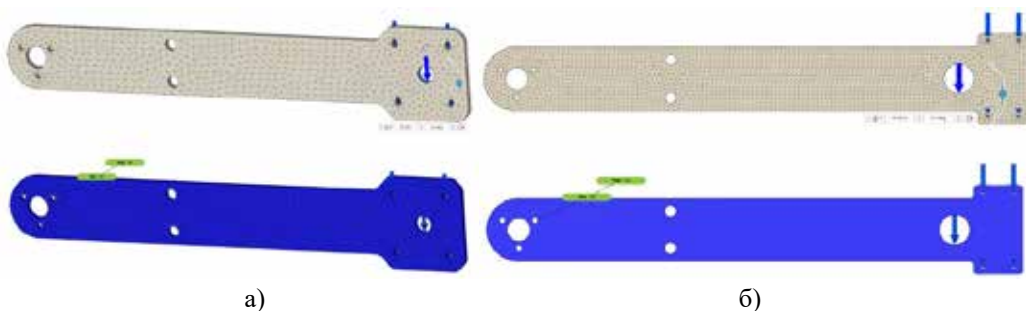


Fig. 10. Loaded link № 4 and simulation (a – right part, b – left)

then link No. 3 will perceive the total load of both links. That is, the load perceived by link №3 will be $11N+2N=13N$, for greater safety a load of $16N$ will be applied. The load simulation is shown in fig. 11.

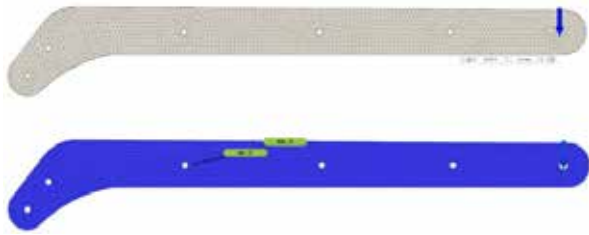


Fig. 11. Load of link №3 and simulation

In fig. 11 we can see that the part can easily withstand the load and has a high margin ratio.

The next detail is link №2 (Fig. 12), which must accept the total load from all previous links. It has an additional load caused by the weight of the linear actuator. The load for testing will be $16N+4N+2N=22N$, for safety we accept $25N$.

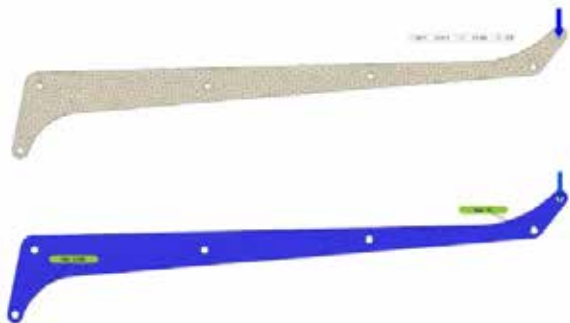


Fig. 12. Load of link №2 and simulation

We can observe that the link easily accepts the set load and has a weight reserve factor of at least 9 times.

The last link is link No. 1 (Fig. 13). It perceives the greatest load, so it is important to correctly load and conduct an analysis.



Fig. 13. Link № 1 load and simulation

The main load is $25N$, it is distributed between two mounting lugs, but to ensure normal perception of the

load by the link, it was decided to check each of the mounting holes to the maximum possible, i.e. $30N$.

To reduce the mass of each of the links, it is necessary to analyze and optimize the form. To conduct the analysis, we will use the Simulation: Shape Optimization plug-in in the Autodesk Fusion 360 automated software control environment [13].

We set the loads identical to the previous experiments and observe the gradation shown in fig. 14.

In fig. 14c shows that the removed material that did not participate in the distribution of the load. If we look at the scale on the right, we can see that the load is fully absorbed by the part on only 40% of the volume, so there is an opportunity to change, modify the shape of the part and make it more rational in the use of resources.

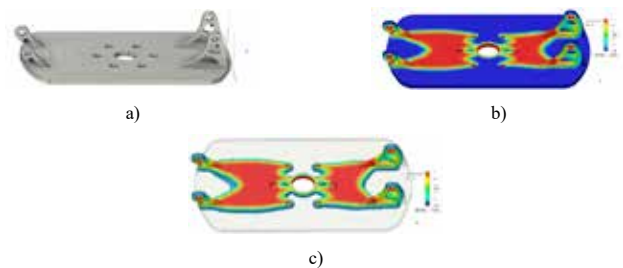


Fig. 14. Results of topological analysis of link № 1
a – the initial view of the link; b – link load;
c – removed material

As a result of the optimization, the use of material was reduced by 45%, the weight changed from $266g$ to $120g$ (Fig. 15), and all strength indicators were preserved, the margin factor was 15.

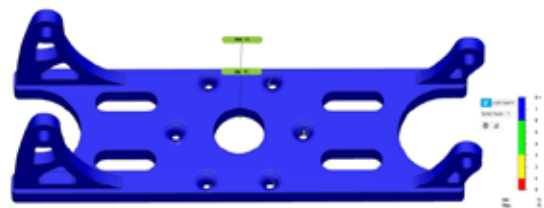


Fig. 15. Optimized link № 1

Figure 16 shows the optimization process of link №2 and link №3. The result is a reduced weight of link №2 (Fig. 16 a, 3) from $82g$ to $57g$, that is, the weight is reduced by 31%, and link №3 (Fig. 16, 3) from $188g$ to $110g$, that is, the weight is reduced by 39 %.

Figure 17 shows the optimization process of link №4. The result is a reduced weight of the right part of the link (Fig. 17 a, 3) from $77g$ to $52g$, that is, the weight is reduced by 33%, the left part of the link (Fig. 17 b, 3) from $77g$ to $47g$, that is, the weight is reduced by 39 % and the shape of additional link 4 in Fig. 18 is optimized.

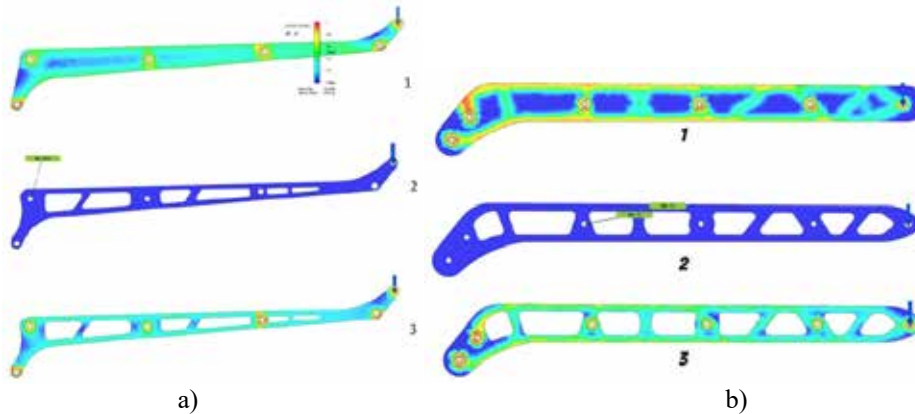


Fig. 16. Optimization of links (a – link №2, b – link №3)

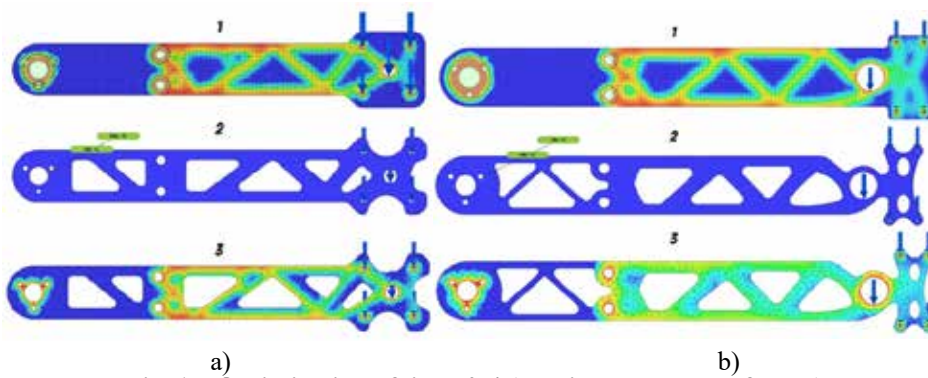


Fig. 17. Optimization of link № 4 (a – right part, b – left part)



Fig. 18. Optimization of the form of auxiliary link 4 (a – link before optimization, b – link after optimization)

The final design is a flat mechanism that rotates about a vertical axis with the help of a motor located at the base of the manipulator.

In fig. 19 shows the manipulator fixed on the platforms before optimization, the total weight of the links was 1060 g. After optimization, the design reduced its mass (Fig. 20), but retained the necessary strength.

Conclusions. To solve the task, the authors developed a kinematic scheme and a movement mechanism of a 5-axis mobile manipulator, performed an analysis and selected stepper motors as the drivers. The rationale for this choice is to increase the positioning accuracy of the gripping mechanism, which will allow for more accurate operations of moving objects. Using the Autodesk Fusion 360 design environment, 3D models of the structural elements of the mobile manipulator were developed, assembly was carried out, and weight and strength parameters were investigated. Using the

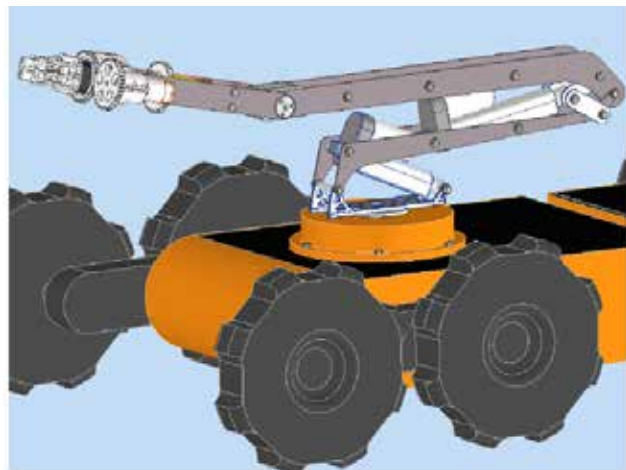


Fig. 19. Link optimization manipulator



Fig. 20. Manipulator after optimization of links

approach to generative design, the authors improved all structural elements and conducted a series of simulations in the Simulation: Shape Optimization plugin. The results of the typological analysis of each link of the developed mobile manipulator showed the possibility of reducing the mass of each part by ~30-40%, depending on its design features, without losing strength parameters. As a result of optimizing the shape of the links, significant changes in the shape and weight of the link manipulator were achieved. It

was possible to reduce the total weight of the MR links from 1060 g (Fig. 19) to 601 g (Fig. 20), that is, the total weight decreased by 41.5%. The authors hope that in the future, the conducted research will allow to reduce the consumption of materials and the time of manufacturing structural elements without loss of strength parameters when using additive technologies (3D printing by the FDM method), and therefore to increase the autonomous operation time of a mobile manipulative robot [14].

Bibliography:

1. Невлюдов І. Ш., Андрусевич А. О., Євсєєв В. В., Новоселов С. П., Демська Н. П. Проектування мобільних маніпуляційних роботів: Монографія. Х., 2022. 427 с.
2. Colucci, G., Baglieri, L., Botta, A., Cavallone, P., Quaglia, G. (2022). Optimal Positioning of Mobile Manipulators Using Closed Form Inverse Kinematics. In: Müller, A., Brandstötter, M. (eds) *Advances in Service and Industrial Robotics. RAAD 2022. Mechanisms and Machine Science*, vol 120. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-04870-8_22
3. Colucci, Giovanni, Andrea Botta, Luigi Tagliavini, Paride Cavallone, Lorenzo Baglieri, and Giuseppe Quaglia. 2022. "Kinematic Modeling and Motion Planning of the Mobile Manipulator Agri.Q for Precision Agriculture" *Machines* 10, no. 5: 321. <https://doi.org/10.3390/machines10050321>
4. A Small-Scale Manipulation Robot a Laboratory Layout Development / Yevsieiev V., Starodubcev N., Maksymova S., Stetsenko K. // *International independent scientific journal*, №47, P.18-28. 2023
5. Shantanu Thakar, Srivatsan Srinivasan, Sarah Al-Hussaini, Prahar M. Bhatt, Pradeep Rajendran, Yeo Jung Yoon, Neel Dhanaraj, Rishi K. Malhan, Matthias Schmid, Venkat N. Krovi, Satyandra K. Gupta. (2023). A Survey of Wheeled Mobile Manipulation: A Decision-Making Perspective. *J. Mechanisms Robotics*. Apr 2023, 15(2). P.25. <https://doi.org/10.1115/1.4054611>
6. Charles C. Kemp; Aaron Edsinger; Henry M. Clever; Blaine Matulevich. (2022). The Design of Stretch: A Compact, Lightweight Mobile Manipulator for Indoor Human Environments. In *International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. 23-27 May. Conference Location: Philadelphia, PA, USA. DOI: 10.1109/ICRA46639.2022.9811922
7. Zhenshan Bing, corresponding author, Fei Chen, Rui Li, Junpei Zhong, and Qiang Li. (2022). Editorial: Biological-Inspired Autonomous Mobile Manipulation: Challenges in Design, Control, and Real-World Applications. *Front Neurorobot.* 2022; 16. DOI: 10.3389/fnbot.2022.928465
8. Vitolo, Ferdinando, Andrea Rega, Castrese Di Marino, Agnese Pasquariello, Alessandro Zanella, and Stanislao Patalano. 2022. "Mobile Robots and Cobots Integration: A Preliminary Design of a Mechatronic Interface by Using MBSE Approach" *Applied Sciences* 12, no. 1: 419. <https://doi.org/10.3390/app12010419>
9. Barbieri, Loris, and Maurizio Muzzupappa. 2022. "Performance-Driven Engineering Design Approaches Based on Generative Design and Topology Optimization Tools: A Comparative Study" *Applied Sciences* 12, no. 4: 2106. <https://doi.org/10.3390/app12042106>
10. Vladyslav Yevsieiev, Nikolaj Starodubcev (2023). Development of a control algorithm for a small-sized mobile manipulation robot. *Scientific Collection «InterConf»*, (140), P. 648-651.
11. Yevsieiev V. (2023) Development of a program for modeling the control of a mobile manipulation robot in the unity environment / Yevsieiev V., Starodubcev N. // *Scientific Collection «InterConf»*, (141), P. 331-334.
12. Development of a 3D Model of a Manipulator for Mobile Robotic Platforms Based on Unigraphics NX / V. Yevsieiev, I. Nevliudov, N. Demska, Y. Valkivskiy // *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. – Серія : Технічні науки. – 2022. – Т. 33(72), № 1. – С. 157–164.*
13. Fusion 360 | 3D CAD, CAM, CAE, & PCB Cloud-Based Software. Available: <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/overview>
14. Attar, H., & et al.. (2022). Zoomorphic Mobile Robot Development for Vertical Movement Based on the Geometrical Family Caterpillar. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2022, Article ID 3046116, <https://doi.org/10.1155/2022/3046116>.

Невлюдов І.Ш., Євсєєв В.В., Демська Н.П., Кострова Г.Ю. РОЗРОБКА ТА УДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЙ ПОЛЕГШЕНОГО МАНІПУЛЯТОРА МОБІЛЬНОГО РОБОТА З ВИКОРИСТАННЯМ ГЕНЕРАТИВНОГО ДИЗАЙНА

Ця стаття присвячена дослідженню можливості мінімізувати масу бортового маніпулятора для мобільного робота без втрати конструктивної міцності. Аналіз публікацій показав, що розв'язання цього завдання дозволить збільшити масу корисного навантаження, отже це дозволить значно збільшити час автономної роботи. Що відповідно дозволить вирішувати більш складні маніпуляційні завдання у зонах підвищеної небезпеки чи техногенних катастроф. Для вирішення поставленого завдання автори розробили кінематичну схему та механізм переміщення 5-вісного мобільного маніпулятора, проведено аналіз та обрано у вигляді рушіїв – крокові двигуни. Обґрунтуванням даного вибору є підвищення точності позиціонування захватного механізму, що дозволить виконувати більш точні операції переміщення об'єктів. Використовуючи середовище проектування Autodesk Fusion 360 розроблено 3D моделі елементів конструкції мобільного маніпулятора, проведено складання та досліджено вагові та міцнісні параметри. Загальна вага маніпулятора склала 1060г, за умов що матеріалом для збереження параметрів міцності буде використовуватися листовий метал товщеної 5мм. Використовуючи підхід до генеративного дизайну, автори провели удосконалення всіх елементів конструкції та провели низку симуляцій у плагіні Simulation: Shape Optimization. Результати типологічного аналізу кожної ланки розробленого мобільного маніпулятора показав можливість зниження маси кожної деталі від ~30-40%, залежно від його конструктивних особливостей, без втрати параметрів міцності. Внаслідок удосконалення конструкції мобільного маніпулятора методом генеративного дизайну, дозволили скоротити загальну масу з 1060г до 601г, тобто маса маніпулятора зменшилася на 41,5%. Автори сподіваються, що проведені дослідження дозволять у майбутньому скоротити витрату матеріалів та час виготовлення конструкційних елементів без втрати міцнісних параметрів при використанні адитивних технологій (3D друк методом FDM), а отже збільшити час автономної роботи мобільного маніпуляційного робота.

Ключові слова: мобільне роботи, маніпулятори, кінематична схема, конструкція, генеративний дизайн, моделювання, Autodesk Fusion 360.

Павлов В.Г.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

КОНТЕКСТНИЙ ПІДХІД У АНАЛІЗІ СХОЖОСТІ ТЕКСТІВ ПРОГРАМ

У статті розглянути особливості аналізу схожості програмних кодів, як складової захисту інтелектуальної власності, до якої відносяться також й комп'ютерні програми. Ці особливості визначаються граматиками побудови мов програмування, які відносяться до формальних граматики, оскільки ці мови не передбачають виключень та розглядають їх як синтаксичні помилки. Розглянутий механізм компілювання, у якому важливу роль відіграє синтаксичний аналіз. Саме на цьому етапі ланцюжка символів програмного коду трансформується у послідовність лексем, які у свою чергу розпізнаються як токени певних типів. Кількість типів токенів визначається граматикою мови програмування, але серед них можна виділити дві основні групи: стандартні токени та токени користувача. Склад та конструкція перших незмінна в межах мови програмування, тому вони зустрічаються у будь-яких текстах різних програм багато разів. Тому абсолютно не має сенсу порівнювати їх, як звичайний текст, бо завжди будуть збіги. Токени користувача називаються так, бо вони формуються виключно автором програми, і, хоча мають певні обмеження, не повинні збігатися, якщо програмний текст розроблявся автором власноручно та самостійно. Тому збіг серед них є однією з ознак схожості текстів програм. Але часто недоброчесні користувачі намагаються приховати копіювання та вдаються до заміни цих токенів без заміни структури програми. Для виявлення ознак схожості текстів програм в цих випадках треба аналізувати структуру текстів програм, яка складається з певної послідовності та взаємного розташування стандартних токенів, тобто використовувати контекстний підхід.

На підставі проведення експериментів, доведено, що використання для порівняння текстів програм тих же підходів та засобів, що і для звичайних текстів, не дозволяє однозначно знайти в них ознаки схожості. Тому зроблено обґрунтовані висновки щодо перспективності розробки спеціалізованих методик та засобів, які будуть спиратися на синтаксичні особливості мов програмування.

Ключові слова: інтелектуальна власність, схожість програмного коду, контекстний підхід, граматичний розбір, токен,

Постановка проблеми. Творчі здібності людини знаходять втілення у її інтелектуальній діяльності, результатом якої є певні здобутки, що відносяться до інтелектуальної власності. Законодавство України чітко визначає, що до об'єктів права інтелектуальної власності відносяться «літературні та художні твори; комп'ютерні програми; компіляції даних (бази даних); ...» [1, стаття 420]. Таким чином, на законодавчому рівні закріплюється виключне право авторів «володіти, користуватися і розпоряджатися результатами своєї інтелектуальної, творчої діяльності, які, будучи благом не матеріальним, зберігаються за його творцями і можуть використовуватися іншими особами лише за узгодженням з ними».

Матеріальним втіленням комп'ютерних програм є їх сирцеві тексти, які здебільшого зберігаються у електронному вигляді, що дозволяє досить легко отримати до них доступ недоброчесним користувачам. Тому дуже гостро стоїть питання виявлення та доведення фактів застосування у про-

грамних продуктах ознак використання чужої інтелектуальної власності без дозволу її авторів.

Проблема виявлення схожості у текстових документах відома давно та існує багато підходів щодо її розв'язання, а саме алгоритми пошуку входження одного рядку у інший Бойера – Мура у різних модифікаціях [2, с. 762-772], алгоритм Кнута – Морріса – Пратта [3, с. 323-350] та інші, але усі вони мають обмежену швидкість та потребують значних обсягів пам'яті для зберігання допоміжних таблиць. Також у багатьох алгоритмах пошуку схожості використовується відомий метод «шинглів» (shingles), запропонований А. Бродером у 1997 році [4, с. 28], який дозволяє підвищити швидкість пошуку за рахунок використання паралельної обробки декількох блоків тексту. Але усі алгоритми розглядають об'єкт пошуку та порівняння як звичайний текст, тобто мають універсальне використання, яке не враховує та не використовує специфіки мов програмування, їх граматику та синтаксис.

Метою статті є викладення граматичних особливостей мов програмування та розгляд їх використання у контекстному підході до аналізу схожості текстів програм. Для досягнення означеної мети вирішуються наступні завдання:

- визначення граматичних особливостей побудови мов програмування;
- використання цих особливостей у аналізі схожості текстів програм.

Виклад основного матеріалу дослідження. Побудова будь-якої мови ґрунтується на множині певних правил, які складають граматику цієї мови. Мови спілкування людей формувалися стихійно, оскільки у них виникала гостра потреба, а граматики формувалися постфактум і часто описували вже існуючі природні мови. Внаслідок цього часто виникали протиріччя між фактичним застосуванням певних мовних фразеологізмів та правилами розробленої граматики, через що у багатьох мовах спілкування з'являлися виключення з правил.

Мови програмування базуються на граматах, які не мають виключень, та завжди формують сталі конструкції, оскільки на підставі цих правил будуються розпізнавачі у складі компіляторів. Будь яка невідповідність правилам граматики трактується як синтаксична помилка та обробляється компіляторами на етапі розпізнавання тексту. Тому мови програмування, як й інші мови, які створювалися штучно, відносяться до формальних мов, а їх граматики до формальних грамастик. Лінгвістична теорія таких мов, яка була розроблена Ноамом Хомскі [5, с. 18-25], описувала ієрархічну структуру, що складалася з чотирьох класів породжуючих грамастик. В залежності від класу, до якого належала граMATика, вона мала описуватися тільки правилами визначеного типу, що відповідало побудові розпізнавача для цієї мови у складі компіляторів.

Таким чином, будь яка мова програмування на відміну від природних мов має сталу множину граматичних конструкцій, яких набагато менше ніж у природних мовах, бо інакше процес компілювання не міг би бути обмежений у часі. Розпізнавач під час граматичного розбору або парсінгу робить певну множину кроків в залежності від кількості гілок у синтаксичному дереві. Як тільки йому вдається побудувати ланцюжку правил граматики, за допомогою яких можна побудувати (породити) певну конструкцію, вона вважається розпізнаною. Усі нерозпізнані конструкції вважаються помилковими і не підлягають компіляції. Оскільки тексти програм, які аналізуються на предмет схожості, не повинні містити синтаксичні

помилки, то усі конструкції повинні відповідати правилам граматики певної мови програмування, а їх складові належать абетці цієї мови.

Розглянемо послідовність обробки будь-якої послідовності символів під час компіляції. Вона зазвичай складається з наступних етапів [6, с. 3]:

- лексичний аналіз, під час якого первісна послідовність розділяється на окремі складові – лексеми, в свою чергу лексеми розподіляються по типам и формують токени – елементарні стали конструкції мови;

- синтаксичний аналіз, при якому аналізуються сполучення токенів, їх послідовність та поєднання, які повинні відповідати правилам граматики даної мови програмування;

- генерація коду, коли кожний токен або їх певне сполучення замінюється фрагментом машинного коду.

Розглянемо більш детально процес формування з лексем токенів, який нагадує розподіл лексем по певним типам. У кожній мові програмування існують певні **стандартні токени**, наприклад:

- ключеві слова (назви команд, операторів, функції тощо);
- знаки математичних операцій;
- знаки логічних операцій;
- дужки;
- знаки розділення та пунктуації.

Усі стандартні токени заздалегідь відомі компілятору, бо вони містяться у ньому у спеціальних таблицях. Кожна лексема спочатку порівнюється зі стандартними токенами зі таблиць. Якщо лексема співпала з якимось стандартним токеном зі таблиці, то вона ідентифікується у програмі як токен певного типу.

Усі ті токени, які не співпали зі стандартними, але задовольняють граматиці мови, відносяться до токенів, що створює програміст, наприклад:

- ідентифікатори (назви змінних);
- числові та символічні літерали (константи).
- мітки.

Звичайно, вони можуть бути різними у різних програмах, написаних на одній і тій ж мові, бо це цілком залежить від фантазії програміста, тому не можуть бути присутніми у таблицях стандартних токенів, а створюють свою таблицю і додаються до неї вже безпосередньо під час лексичного аналізу. Будемо ці токени у подальшому називати **токенами користувача** або користувачькими.

Саме наявність у складі текстів програм токенів цих двох типів ї визначає їх граматичну особливість у порівнянні зі звичайними текстами, а саме:

– наявність у текстах, що порівнюються, повторень або збігів стандартних токенів не є безперечною ознакою наявності їх схожості;

– наявність збігів у токенах користувача, навпаки, є безперечною ознакою такої схожості, бо вірогідність, що довільні назви будуть однаковими майже нульова, якщо авторами текстів програм були різні люди.

Ці дві важливі особливості граматики текстів програм можна покласти у основу стратегії аналізу схожості текстів програм, а саме:

1. Стандартні токени позначають певний каркас текстів програм, до якого «прив'язано» розташування токенів користувача.

2. Відмінності виключно лише у користувацьких токенах при однакових «каркасах» програм можна вважати ознакою схожості.

Для ілюстрації цього факту можна привести практику заміни назв змінних у текстах програм при збереженні послідовності стандартних токенів.

Наприклад у фрагменті тексту програми на мові C:

```
for (int i = j; j >= 0; i--)
{
    if (input[i] == "=")
    {
        exitCode.Append(" " + input[i - 1]);
        break;
    }
}
```

внесені зміни шляхом взаємної заміни назв ідентифікаторів *i* та *j*:

```
for (int j = i; i >= 0; j--)
{
    if (input[j] == "=")
    {
        exitCode.Append(" " + input[j - 1]);
        break;
    }
}
```

Зрозуміло, що з позиції програмування ці два фрагменти мають ознаки 100% схожості, але якщо до цих фрагментів коду застосувати той же підхід, що й до фрагментів звичайного тексту, то результат буде зовсім іншим. Для проведення експерименту були вибрані декілька безкоштовних програмних продуктів для порівняння двох текстів у он-лайн режимі. Тому у тестуванні не використовувалися такі програмні засоби, як UNICHECK (<https://unicheck.com>), Edu-Birde (<https://edubirdie.com>), **ABBYU Comparator** (<https://www.abbyu.com>), **WinMerge** (<https://winmerge.org>), **Araxis Merge** (<https://araxis.com/merge/>), Etxt Antiplagiat ([\[etxt.ru\]\(https://www.etxt.ru\)\), **Text.ru** \(<https://text.ru/>\), **Shingles Expert** \(<http://makebusiness.ru>\), **TextDiff** \(<http://www.angusj.com>\), **Kaleidoscope** \(\[kaleidoscopeapp.com\]\(http://kaleidoscopeapp.com\)\), **Beyond Compare** \(<https://www.scootersoftware.com/download.php>\), **DeltaWalker** \(\[deltawalker.com\]\(http://deltawalker.com\)\), **Gedit** \(<https://wiki.gnome.org/Apps/Gedit>\), **Vim** \(<https://www.vim.org>\), бо вони або потребували інсталяції, реєстрації або сплати за використання.](https://www.</p>
</div>
<div data-bbox=)

Вказані фрагменти програмного коду порівнювалися за допомогою таких 9 програм: **DiffChecker** (<https://www.diffchecker.com/text-compare/>), **Charactercalculator** (<https://charactercalculator.com/ru/text-compare/>), **Leaubk** (https://leaubk.com/2_text), **Draftable** (<https://draftable.com/compare>), **Pr-cy** (<https://pr-cy.ru/difference/>), **Copyleaks** (<https://app.copyleaks.com/ru/text-compare>), **Anytexteditor** (<https://anytexteditor.com/ru/text-compare>), **Smodin** (<https://smodin.io/uk/>), **Siteanalyzer** (<https://siteanalyzer.pro/uk>). Усі вони успішно знаходили та помічали розбіжності у фрагментах програм, але лише чотири останні з них робили спробу якись чином кількісно оцінити ці розбіжності. На жаль, розробники більшості подібних програм не надають інформацію яким чином проводяться ці кількісні оцінки, лише у двох з них (**Copyleaks** та **Anytexteditor**) можна зрозуміти, що у оцінюванні ступені схожості враховується відносна кількість виявлених відмінностей при посимвольному порівнянні, а у програмі **Siteanalyzer** надається інформація, що при порівнянні використовуються «шингли» розміром у 4 слова. За підсумками тестування були отримані наступні результати:

- **Draftable** – 72% схожості;
- **Anytexteditor** – 87.96% схожості (відрізняються 13 символів зі 108);
- **Smodin** – 9% плагіату;
- **Siteanalyzer** – тексти схожі на 0%, тому що жодний «шингл» не співпав.

Якщо у перші дві програми дають оцінки схожості хоча б якось наближені до дійсності, то дві останні дуже важко пояснити логічно, бо нагадаємо, що тестові тексти з точки зору відповідності програмних кодів *не мають відмінностей*, тобто схожість складає **100%**.

Таким чином, шляхом тестування програм, що визначають схожість текстів, експериментально доведено, що вони *надають хибну інформацію, а тому не можуть бути застосовані для порівняння програмних кодів*. З цього випливає, що застосування до аналізу схожості програмних кодів тих же підходів та алгоритмів, що й до звичайних текстових документів, *неправомірно*, а, відповідно, повинні застосовуватися спеціальні

методи, основані на граматичних особливостях мов програмування.

Другий експеримент, який було проведено з іншими фрагментами програмного коду на мові С, був спрямований продемонструвати, що програми порівняння текстів не враховують синтаксичний контекст фрагментів, які аналізуються.

Нехай треба порахувати суму $S = \sum_{i=1}^{10} \frac{1}{i}$. Зрозуміло, що для цього у програмі повинен бути організований цикл, у якому змінна i буде послідовно приймати значення від 1 до 10. Але існує декілька способів організації таких циклів, наприклад покроковий цикл, цикл з передумовою та цикл з післяумовою. Для двох останніх випадків фрагменти програмного коду будуть мати вигляди:

- з передумовою:

```
i=1;
s=0;
while(i<=10)
{
s=s+1/(i*i);
i=i+1;
}
```

- з післяумовою:

```
i=1;
s=0;
do
{
s=s+1/(i*i);
i=i+1;
}
while (i<=10);
```

За підсумками порівняння фрагментів текстів цих програм отримано:

- **Draftable** – 85,7% схожості;
- **Anytexteditor** – 46.75 схожості (відрізняються 36 символів зі 77);

- **Smodin** – 37% плагіату;
- **Siteanalyzer** – тексти схожі на 0%, але знову причина у тому, що жодний «шингл» не співпав.

У наведеному прикладі у фрагментах коду використовуються *одні й ті ж самі назви змінних та арифметичні оператори*, але *різні* конструкції операторів циклу, які мають *різну синтаксичну побудову*. Тобто при компіляції цих фрагментів розпізнавачі будуть будувати *різні* синтаксичні дерева, тож є безумовні підстави вважати ці фрагменти кодів *різними*. Але програмні засоби, які виконують аналіз схожості, не розрізняють відмінності у стандартних і користувацьких токенах, тому надають спотворений результат порівняння, який не відповідає дійсності, а тому програми порівняння текстів не підходять для програмних кодів.

Висновки. Отримані результати аналізу схожості текстів програм за допомогою засобів, які використовують той же підхід, що й до звичайних текстів, дають підстави зробити наступні висновки:

1. Стандартний підхід до визначення схожості звичайних текстів не може бути використаний для порівняння текстів програм, оскільки не враховує синтаксичні особливості побудови мов програмування.
2. При аналізі програмних кодів треба враховувати, що тексти програм складаються з токенів двох типів, тому збіги у стандартних токенах не є ознакою схожості, у той час, як збіги у користувацьких токенах є певною її ознакою.
3. Важливою ознакою для прийняття рішення щодо наявності або відсутності схожості текстів програм є послідовність та взаємне розташування у коді стандартних токенів з однаковим розміщенням відносно них токенів користувача, тобто контекстний підхід.

Список літератури:

1. Цивільний кодекс України: Закон України від 16.01.2003 № 435-IV. *Відомості Верховної Ради України*, 2003, №№ 40-44, ст.356. Дата оновлення: 28.03.2023. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/435-15#Text> (дата звернення 29.03.2023).
2. Boyer R. S., Moore J. S. A fast string searching algorithm. *Communication of the ACM*. 1977. V. 20. No 10. P. 762–772.
3. Knuth D. E., Morris J. H., Jr., Pratt V. R. Fast pattern matching in strings. *SIAM Journal on Computing*. 1977. V. 6. No 2, P. 323–350. DOI: <https://doi.org/10.1137/0206024>.
4. Broder A. Z. On the resemblance and containment of documents. *Proceedings. Compression and Complexity of SEQUENCES 1997 (Salerno, Italy 13-13 June 1997)*. IEEE Computer Society, 1998. P. 21–29. DOI: <https://doi.org/10.1109/SEQUEN.1997.666900>.
5. Chomsky N. *Syntactic structures*. Copyright 1957, Second Edition, Berlin: Mouton de Gruyter, 2002. 117 p.
6. Pavlov V. Nullifying rules influence on speed in context free grammar LL(1). *Journal of Theoretical and Applied Computer Science*. Polish Academy of Sciences, Gdansk Branch, Computer Science Commission. 2016. V2. P. 3–15.

Pavlov V.G. CONTEXTUAL APPROACH IN ANALYZING THE SIMILARITY OF PROGRAM CODES

In the article to consider the features of the analysis of the similarity of program codes, as a component of the protection of intellectual property, which also includes computer programs. These features are determined by the grammars of constructing programming languages that relate to formal grammars, since these languages do not involve exceptions and treat them as syntactic errors. The compilation mechanism in which syntactic analysis plays an important role is considered. It is at this stage that the chain of characters of the program code is transformed into a sequence of lexemes, which in turn are recognized as tokens of certain types. The number of token types is determined by the grammar of the programming language, but among them are two main groups: standard tokens and user tokens. The composition and construction of the former is unchanged within the programming language, so they are found in any texts of different programs many times. Therefore, it absolutely does not make sense to compare them like plain text, because there will always be coincidences. User tokens are called so because they are formed solely by the author of the program, and, although they have certain limitations, should not coincide, if the program text was developed by the author personally and independently. Therefore, the coincidence among them is one of the signs of the similarity of the texts of programs. But often dishonest users try to hide the copying and resort to replacing these tokens without replacing the program structure. To identify signs of similarity of program texts in these cases, it is necessary to analyze the structure of the texts of programs, which consists of a certain sequence and relative arrangement of standard tokens, that is, to use a contextual approach.

Based on the experiments, it is proved that the use of the same approaches and tools for comparing texts of programs as for ordinary texts, does not allow to find signs of similarity in them unambiguously. Therefore, reasonable conclusions have been made regarding the prospects of developing specialized methods and means, which will rely on the syntactic features of programming languages.

Key words: *intellectual property, similarity of program codes, contextual approach, grammatical parse, token.*

Протасов А.Г.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Сторожик Д.В.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ТЕХНОЛОГІЇ АВТОМАТИЗАЦІЇ ДІАГНОСТИКИ ДОРОЖНЬОГО ПОКРИТТЯ

Дороги є основною транспортною системою у будь-якій країні, а в Україні вони складають 169,5 тис. км., що є найбільшим об'єктом критичної інфраструктури. Враховуючи, що дорожні покриття схильні до зносу та старінню, то ефективна та своєчасна оцінка їх стану стає вирішальною для забезпечення безпеки транспортної системи та для зниження надмірних витрат на ремонт та технічне обслуговування. Тому, метою цієї роботи став аналіз автоматизованих технологій виявлення та класифікації пошкоджень дорожнього покриття та визначення напряму подальшого розвитку цих технологій.

У статті розглядається використання деяких методів неруйнівного контролю для автоматизованого виявлення та класифікації пошкоджень дорожнього покриття, аналізуються їх переваги та недоліки. Багато дослідників використовували методи обробки зображень для автоматизації процесу обстеження та підвищення якості та точності результатів обстеження. Сьогодні, з розвитком теорії та практичного застосування нейронних мереж, спостерігається тенденція поєднання методів контролю з нейронними мережами, що дає можливість використання сучасних методів машинного навчання для автоматизації обробки та оцифрування даних. Наступна тенденція, що спостерігається в напрямку автоматизації моніторингу стану дорожнього покриття – це розробка мультисенсорних роботизованих систем. Використання таких систем дозволяє здійснювати автономний збір даних та надає можливість аналізу даних практично в реальному часі. В статті описуються деякі з останніх розробок в області автономних роботизованих платформ для неруйнівного контролю та моніторингу стану доріг та мостових конструкцій.

Ключові слова: автоматизація обробки зображень, неруйнівний контроль, моніторинг дорожнього покриття.

Постановка проблеми. Дорожньо-транспортне покриття пронизує країну наче артерії, що живлять економіку України. Автомобільні шляхи в Україні складають 169,5 тис. км., що є найбільшим об'єктом критичної інфраструктури в Україні. На ремонтні роботи цих об'єктів, спрямовується велика частина коштів, тому вивчення шляхів зменшення видатків є важливою задачею. Зазвичай, вартість реконструкції дороги, що погіршилася внаслідок відсутності технічного обслуговування, може більш ніж втричі перевищувати вартість збереження дороги, яка часто обслуговується [1].

ДСТУ 8954 виділяє 3 основні шляхи проведення діагностики якості дорожнього покриття [2]: експертно-візуальний метод; візуально-інструментальний метод та автоматизований метод. Сьогодні найбільш часто використовуються експертно-візуальний та візуально-інструментальний методи, де діагностику проводять експерти

оглядаючи дорожнє покриття або використовуючи спеціальні вимірювальні пристрої. При цьому, для обробки результатів використовують алгоритми на основі пікселів для визначення характеристик тріщини, але цей підхід вимагає багато часу Dare P. et al [3].

Метою цієї роботи є аналіз автоматизованих технологій виявлення та класифікації пошкоджень дорожнього покриття та визначення напряму подальшого розвитку цих технологій.

Технології з використанням видимого випромінювання

Зображення у видимому випромінюванні отримують з датчиків які розташовані на борту автомобіля або супутниках, іноді використовують фото з камери телефона. В більшості випадків, для обробки цих зображень використовують класичні алгоритмічні методи розпізнавання та реєстрації образів. Популярними методами обробки зображень дорожнього покриття є методи засновані на

використанні бінарних зображень [4, 5]. У роботі [6] запропоновано методи цифрової обробки вхідних бінарних зображень для спеціалізованого програмного забезпечення, яке об'єктивно та повністю автоматично визначає тип, ступінь та серйозність тріщини поверхні для гнучких дорожніх тротуарів.

Для реалізації процесу автоматичної обробки зображень покриття доріг і мостів, багато авторів використовують у своїх методах алгоритми, засновані на виявленні країв об'єктів. Так, у роботі [7] авторами було використано фільтри Габор. При цифровій обробці зображень ці фільтри застосовуються для розпізнавання меж об'єктів, вони мають імпульсну перехідну характеристику, яка визначається у вигляді гармонійної функції, помноженої на гауссіан. Автори застосували фільтри Габор для виявлення поздовжніх і поперечних тріщин у дорожньому покритті. Для вибору та об'єднання класифікаторів було застосовано алгоритм машинного навчання AdaBoost. Цей алгоритм покращує результати, що надаються одним класифікатором, але його недоліком є чутливість до шуму даних і викидів. Крайовий аналіз зображень для реалізації автоматизованої процедури виявлення тріщин пропонується й у роботі [8]. Автори розглядають використання двох алгоритмів – Кенні та швидкого перетворення Хаара ФНТ. У роботі використовується автоматизована статистична процедура, заснована на аналізі робочих характеристик приймача з метою знайти оптимальний набір його параметрів та теорії прийняття рішень Байєса. Запропонований метод проведення аналізу зображень застосовується для оцінки пошкоджень бетону – тріщин, викришування тощо. Застосування алгоритмів – Кенні для цифрової обробки зображень також було представлено у статті [9], де зображення тротуару розглядалося за шкалою сірого і зниження шуму було згладжено за допомогою фільтра Гауса. Перевага методу полягає в його здатності виявляти краї у присутності шуму та знаходити слабкі краї. Однак, при застосуванні фільтра Гауса відбувається згладжування меж, які вважаються високочастотною ознакою. Це збільшує можливість пропуску слабких країв і появи в результаті згладжування ізольованих країв.

Технології на основі нейронних мереж

Швидкий розвиток інтелектуальних алгоритмів виявлення на основі глибокого навчання дозволив ефективно вирішувати питання трудомісткого процесу перевірки стану доріг. Авторами роботи [10] розроблена на базі нейронних мереж система під назвою «Road Atlas» для класифікації та сегмента-

ції тріщин. Цю систему зроблено з використанням сучасних підходів web-розробки і вона має сучасний web-інтерфейс взаємодії з користувачем, який підтримує різні функції зовнішнього вигляду. Система має вбудований сервер, створений за допомогою мови програмування Python та мікро фреймворк (micro framework) для web-додатків Flask. Сервер дозволяє обмін даними з інтерфейсом і зберігає інформацію в базі даних MongoDB.

У роботі [11] запропоновано систему для автоматизованого виявлення тріщин та їх класифікації з використанням архітектури глибокої згорткової нейронної мережі (DCNN). Оптичне зображення дорожнього покриття автори сегментували на патчі та використали їх для навчального набору даних з вихідними тріщинами та навченої DCNN з фільтрами двох різних розмірів: 3x3 та 5x5. Для оцінки продуктивності мережі DCNN використовувався кількісний аналіз результатів класифікації тротуарної плитки. Ефективність виявлення тріщин була розрахована з використанням трьох характеристик: "recall", "precision" та "accuracy". Характеристику "recall" автори розглядали як відсоток зразків тріщин, що ідентифіковано мережею із загальної кількості тріщин у наборі даних. "Precision" – це відсоток прогнозованих тріщин, які насправді були тріщинами. Під характеристикою accuracy розумівся відсоток правильно класифікованих тріщин і зразків без тріщин із загальної кількості тріщин і зразків з відсутністю тріщин в наборі даних. Усі три параметри розраховувалися наступним чином [12]:

$$\text{recall} = \frac{TP}{TP + FN}; \quad \text{precision} = \frac{TP}{TP + FP};$$

$$\text{accuracy} = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN},$$

де TP – дійсні позитивні результати; TN – дійсні негативні результати; FP – хибні позитивні результати; FN – помилкові негативні результати.

Результати проведених авторами експериментів, відносно продуктивності роботи запропонованої мережі по визначенню тріщин за характеристиками "recall", "precision" та "accuracy" показані в таблиці 1.

Таблиця 1 [11]

Результати експериментів

Розмір фільтру	Recall	Precision	Accuracy
3x3	98.1%;	99.1%	99.0%
5x5	98.0%;	99.0%	99.0%

Однак авторам не вдалося вирішити проблему наявності шумових візерунків, таких як тіні, мас-

ляні та водяні плями на поверхні дорожнього покриття. Наявність цих візерунків робить виявлення тріщин дуже складним завданням пропонованої DCNN і знижує ефективність класифікації.

У дослідній роботі [13] розглядається система виявлення дефектів тротуарів, заснована на нейронній мережі з глибоким навчанням YOLO. Мережа YOLO була використана для прогнозування можливого розташування та категорії дефекту. Комплексна точність виявлення сягнула 73,64%. Швидкість обробки зображень відповідала 0,0347 с/рис, що в 9 разів швидше, ніж у згорткової мережі на основі швидких областей Faster R-CNN і тільки на 70%, ніж у SSD – мережі, що призначена для виявлення об'єктів в режимі реального часу. Результати показали, що метод має обмежене застосування та залежить від відповідного освітлення.

Технології з використанням інфрачервоного випромінювання

На ринку вимірювальних приладів з'явилися тепловізійні камери з високою роздільною здатністю і високою термочутливістю, це дозволило використовувати інфрачервону термографію (ІЧТ) в нових областях, у тому числі і для оцінки якості поверхні асфальтового покриття. Разом з тим, поряд з успішним застосуванням ІЧТ виникає низка проблем. Одна з них, це складність автоматизації обробки й аналізу теплових зображень [14]. Друга проблема спричинена такими факторами, як коливаннями температури навколишньої температури, наявністю неоднорідності коефіцієнта випромінювання асфальтного покриття та тіней від придорожніх дерев, недостатньою частотою розгортки камери та ін. [15, 16].

Вирішенню таких проблем присвячена робота вчених Чеської республіки [17]. У роботі досліджувалась можливість використання тепловізійних камер для проведення діагностики стану дорожнього покриття на вимірювальному транспортному засобі. Дослідження показали, що дефекти на дорожньому покритті можуть бути виявлені за допомогою тепловізора (рис.1).

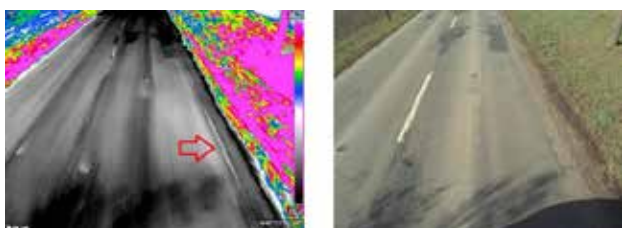


Рис. 1. Термограма (а) та цифрова фотографія (б) тріщини на тротуарі [17]

Червоною стрілкою на рис. 1а позначена тріщина в дорожньому покритті, яка зафіксована тепловізійною камерою. При порівнянні термограми з фотографією тієї ж ділянки (рис. 1б) можна побачити, що зображення тріщини більш помітне на термограмі. Разом з тим, існують певні обмеження у використанні тепловізорів для отримання теплових зображень дорожнього покриття – записи теплових зображень виявляються розмитими при швидкості автомобіля більшої за 40 км/год і кут нахилу камери відносно площини дороги мусить бути не менше 45°.

При стандартній частоті розгортки камери в 50 Гц було отримано настільки великий об'єм інформації, що її не вдалося опрацювати, тому дослідники змушені були зменшити частоту розгортки до 12 Гц.

Використання коефіцієнта випромінювання асфальтного покриття як основного інформаційного параметру при проведенні термографічного контролю доріг було запропоновано у роботі [18]. Зі старінням асфальту зменшується його масляниста складових, що призводить до збільшення на поверхні вапняку. Використовуючи високе поглинання вапняком ІЧ випромінювання на довжині хвилі 11,2 мкм, автори змогли виявити ділянки зношеності. Ця методика не може бути застосована в міських умовах через так званий ефект теплового острову – відбите випромінювання від навколишньої місцевості (яскравісні ефекти). Відбите випромінювання, поглинання випромінювання атмосферою та зовнішні фактори, такі як вітер, дощ або сонячне світло, впливають на місцеві температури та ускладнюють інтерпретацію інфрачервоних зображень [19].

Використання ІЧТ для виявлення порожнин під дорожнім покриттям було досліджено в роботі [20]. ІЧТ дає можливість виявляти під поверхневі дефекти, але вона не завжди ефективна при використанні традиційних методів обробки зображень, таких як, наприклад, похідні зображення. Тому, авторами було досліджено застосування сучасних методів аналізу ІЧ-зображень, таких як аналіз коефіцієнта детермінації (R2), термографія основних компонентів (PCT) і термографія розділених основних компонентів (S-PCT).

Перевірка ефективності цих методів та їх точність виявлення порожнин під дорожнім покриттям виконувалася на лабораторній моделі проїжджої частини. Поверхня моделі дороги прогрівалася протягом 6 годин для імітації сонячного нагріву, а потім, поки модель остигала, збиралися ІЧ-зображення. Зокрема зображення записува-

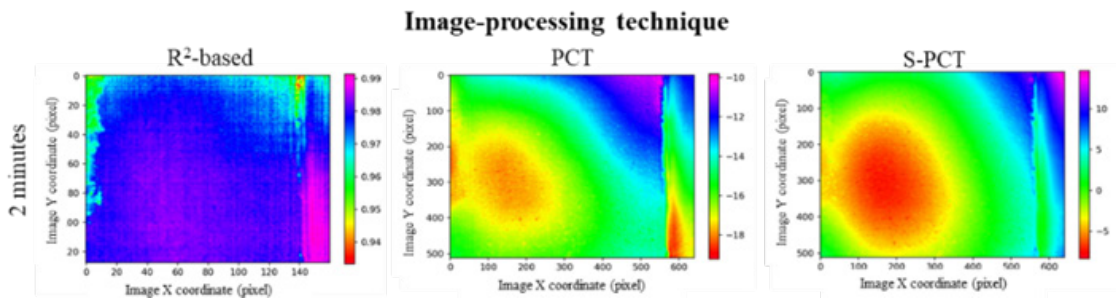


Рис. 2. Результати порівняння аналізу термограм методами на основі R2, PCT та S-PCT [20]

лися з інтервалами: 2 хвилини, 5 хвилин, 10 хвилин, 15 хвилин.

Для виконання методу PCT авторами роботи [20] було взято часовий ряд ІЧ-зображень, знятих у моменти часу $t = t_1, t_2, \dots, t_n$. Перед застосуванням PCT кожне інфрачервоне зображення перебудовувалося для створення вектора температури T_i . PCT – це метод лінійної декомпозиції, чутливий до шумів в зображенні та викидів. Для боротьби з нелінійністю та прихованими змінними була розроблена модифікована версія PCT, яка називається термографією розріджених основних компонентів (S-PCT). Найбільш істотною відмінністю від PCT є те, що головні компоненти витягуються за допомогою задачі оптимізації, заснованої на загальній кількості ненульових елементів у векторі температури та сумі всіх абсолютних значень у векторі [21]. Завдяки використанню ненульових елементів та особливостям розрідженості теплового розподілу S-PCT став надійнішим методом, ніж PCT, що підтвердили результати виявлення порожнин (рис. 2).

З трьох методів, що розглядалися в цьому дослідженні, S-PCT показує стійкіший відгук при всіх частотах дискретизації. Загалом середня точність S-PCT становить близько 90% з максимальною точністю 96%, коли ІЧ-зображення збираються з 2-хвилинною частотою дискретизації.

Marcello Stimolo [22] дає огляд пошкоджень, які можна виявити за допомогою ІЧТ у дорожньому та мостовому покритті. Особлива увага приділяється виявленню бульбашок у гідроізоляційних мембранах та настилах мостів. Термограми можуть бути використані як під час будівництва, так і в процесі експлуатації об'єкта. Однак цей метод не ефективний при контролі доріг із ямковим ремонтом. При аналізі термограм яма після ремонту виглядає як дефект покриття через свою схожість з порушенням суцільності.

Технології з використанням георадарів та лазерних сканерів

Принцип роботи георадара заснований на використанні відбитих електромагнітних імпульсів високої частоти (10 МГц – 2,6 ГГц) при скануванні поверхні доріг та побудови зображення під поверхневого шару.

У роботі [23] представлені дослідження можливості використання георадара з наземним зв'язком для виявлення неглибокого розшарування у покриттях із суцільного армованого бетону. У статті демонструються результати геолокації – розшарування розрізу бетонного покриття без розпилу і керн структури у місці, де підозрюється наявність дефекту (рис. 3).

Відсутність сильних відбитків сигналу від внутрішньої структури була оцінена як зона без дефекту («no defect area»). Зона розшарування («delamination area») мала більш явний сигнал георадару, вона відзначена маркером як «stack location» і інтерпретована як відшарування.

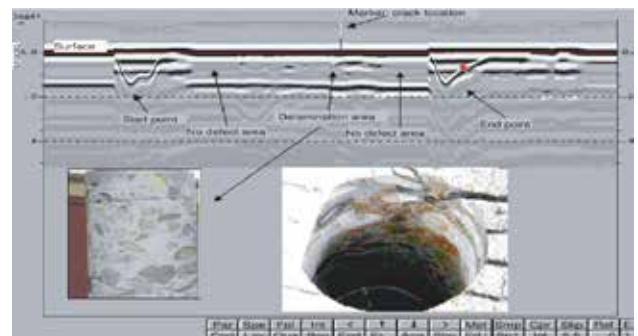


Рис. 3. Порівняння результатів георадара із зразком керн на повну глибину в зоні підтвердженого розшарування [23]

Цей підхід був оцінений авторами як потенційно перспективний, хоча отримане зображення дуже важко інтерпретувати – відрізнити область з дефектом від бездефектної дуже непросто.

Проблеми обробки та інтерпретації даних георадара присвячена робота [24]. Автори предста-

вили багатоетапний метод обробки даних, зібраних на реальній гнучкій дорожній конструкції. Цей метод передбачає корекцію вихідного сигналу, видалення низькочастотних гармонік, усунення дзвону антени радара, посилення сигналу та смугову фільтрацію. Автори дійшли висновку, що автоматизація процесу контролю стану доріг полягатиме в необхідності використання багатоканальних радіолокаційних систем та багатоканальної обробки георадарних даних. Принципи роботи георадарних систем, включаючи методи обробки сигналів та інтерпретації даних узагальнені у [25]. Наголошується, що важливим аспектом застосування георадару у дослідженнях дорожніх покриттів є розробка зручних програмних систем для поєднання результатів георадару з іншими методами.

Найпопулярніші та найкорисніші застосування георадара в діагностиці дорожнього покриття включають вимірювання товщини шару дорожнього покриття та виявлення пустот [26, 27].

Грунтовний аналіз рівня розвитку методів контролю транспортної інфраструктури з використанням георадару та сучасні результати досліджень з цієї тематики представлені у [28]. В роботі обговорюються переваги та недоліки георадарного обстеження. Зазначається, що сьогодні цікавою областю досліджень є поєднання георадару та інших засобів неруйнівного контролю з роботизованими платформами.

Суттєвим недоліком використання георадару залишається складність інтерпретування результатів обстеження. Грунт, що обстежується має невідомі діелектричні властивості, які неможливо врахувати при геолокації, а його неоднорідність призводить до зашумлення зображень. Без достатньої інформації про електромагнітні властивості підземних матеріалів метод буде не точним [28].

В останній час набуває популярності використання методу дистанційного зондування на основі лазерних сканерів або так званих лідарів (LiDAR – Light Detection and Ranging), що означає «виявлення та визначення дальності за допомогою світла». Технології на основі лідарів дозволяють створювати просторово точні цифрові моделі фізичних об'єктів з високою роздільною здатністю, відомих як «хмари точок» [29]. Застосування технологій 3D лазерного сканування з метою виявлення дефектів дорожнього покриття наведені у роботі [30]. В ході дослідження авторами проводилося лазерне сканування дорожнього полотна. В результаті були побудовані тривимірні зображення точок із «хмари точок».

У процесі обробки результатів на основі сітки було вилучено конкретні точки, що мають ознаки дефектності. Автори показують, як LiDAR та методи обробки даних на основі сітки можуть бути застосовані до проблемних ділянок дороги, таких як маленькі вибоїни, вибоїни великих площ та поверхневі латки.

3D-моделі поверхні можна використовувати для оцінки стану дорожньої та аеропортової інфраструктури, визначення низинних ділянок, схильних до дренажу та проблем із затопленням. Точність вимірювань таких нерівностей може складати до 2 см [31]. Експериментальні результати показують, що проблемні ділянки можуть бути точно та автоматично визначені. Таким чином, можна автоматизувати не тільки процес моніторингу характеристик дорожнього покриття, але й розрахунок необхідної кількості матеріалів для заповнення порожнин при ремонті. Одним із обмежень систем на основі LiDAR є те, що вони сканують та відображають лише видимі поверхні. Отже, вони можуть надати інформацію лише про поверхневі дефекти.

Комбіновані методи з використанням мульти-сенсорних систем

Використання двох або більше датчиків при моніторингу стану дорожнього покриття дає більш інформативний результат. У дослідженні [32] автори пропонують метод двосвітлової інспекції (DLI dual-light inspection) для зменшення хибних спрацьовувань при попаданні в поле огляду плям розливу оліви, нафти, тині або дорожньої розмітки. Традиційні методи обробки зображень часто помилково сприймають ці чинники як дефектність дорожнього полотна. Метод DLI використовує два зображення одного місця огляду при різному освітленні і складається з чотирьох основних етапів: (1) захоплення зображення об'єкта з різним освітленням; (2) віднімання зображення – два зображення віднімаються попіксельно, щоб отримати зображення, яке представляє відмінності між зображеннями для суміщення; (3) покращення зображення – для вилучення ознак дефектності застосовується метод виявлення меж та (4) класифікація зображень – алгоритм класифікації використовується для пошуку відмінностей у зображеннях, які включають дефектність та тих, що її не містять. На рис. 4 показано результати обробки зображень.

Автори порівняли точність методу DLI із традиційними методами, які використовують окремі зображення. Наприклад, значно підвищилася точність визначення розливу маслянистої рідини

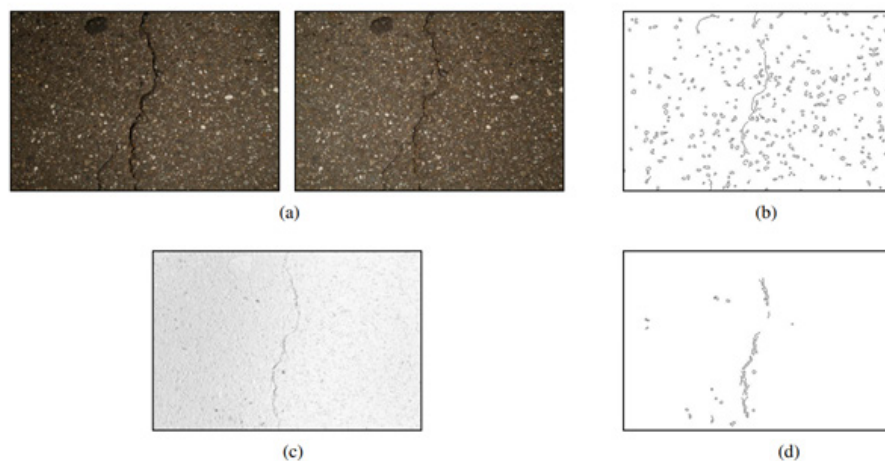


Рис. 4. Результат визначення поздовжньої тріщини: (а) зображення з різним освітленням; (б) застосовано метод виявлення країв до вихідних зображень; (с) зображення, що віднімається; (г) застосовано метод виявлення краю зображень, що віднімаються [32]

(традиційний: 18%, DLI: 82%) та виявлення поздовжніх тріщин (традиційні: 62%, DLI: 69%).

Порівняння поширених технологій дистанційного зондування з погляду їх застосування для класифікації дорожнього покриття представлено у статті [33]. Автори дають огляд застосування оптичних, лазерних, ультразвукових та мікрохвильових датчиків для класифікації поверхонь. З аналізу випливає, що об'єднання даних датчиків дозволяє отримати точніші і достовірні результати. З іншого боку, така технологія суттєво ускладнює автоматизацію процесу контролю.

У роботі [34] представлений метод виявлення тріщин на основі згорткової нейронної мережі та інфрачервоної термографії. Для створення еталонного набору даних були використані зображення трьох типів: видимі, інфрачервоні та злиття видимих та інфрачервоних зображень. На цьому наборі даних навчалися та оцінювалися сім моделей сегментації нейронної мережі. Результати показують, що точність та передбачення видимого зображення та зображення злиття практично ідентичні для всіх моделей і вони набагато кращі, ніж інфрачервоні зображення. У разі шорсткого фону або схожості тріщини з фоном, зображення злиття є найкращим вибором для виявлення тріщин. Порівняно з видимим зображенням, всі моделі сегментації мають більш стабільну продуктивність для злитого зображення. Серед моделей сегментації кращою була визначена модель Feature Pyramid Networks (FPN), оскільки вона має високу точність і низьку складність.

Комбіноване застосування георадару та інфрачервоної термографії для виявлення та визначення характеристик тріщин у дорожньому покритті та їх походження розглядається авторами роботи [35]. Інфрачервона термографія допомагає виявляти поверхневі та під поверхневі ушкодження та дефекти за рахунок реєстрації випромінювання в інфрачервоному діапазоні. Однак цей метод не дає інформації про глибину дефектів, оскільки вловлює випромінювання тільки з поверхні. Автори пропонують його комбінувати з іншими неруйнівними методами, такими як георадар. Дані, отримані двома методами при виявленні тріщин, доповнюють один одного.

Оглядова стаття Elseicy A. et al [36] наводить найбільш актуальні роботи, що присвячені комбінованому застосуванню георадару та інших методів неруйнівного контролю для моніторингу дорожнього покриття. Доводиться, що методи неруйнівного контролю разом із георадаром можуть надати докладні карти стану поверхні та під поверхневих шарів в одній і тій же області за різних погодних умов та умов освітлення. В результаті, обмеження застосування кожного методу НК зводяться до мінімуму, а загальна інформативність результатів зростає.

Автори стверджують, що при використанні комбінованих методів контролю поверхні, існують можливості використання сучасних методів машинного навчання для автоматизації обробки та оцифрування даних та використання цих даних для створення надійних моделей, які можуть навчатися. Використання сучасних роботизова-

них систем дозволяє здійснювати автономний збір даних та надає можливості аналізу даних практично в реальному часі.

Проте, під час роботи з комбінованими системами виникає безліч проблем. Процес збору даних відрізняється за часом та вартістю для різних методів НК. Спільна обробка даних також може бути складною через різноманітність даних та придатність до додатку, тому постає задача підвищення інформативності кожного з методів НК [37].

Розробка повністю автономної роботизованої платформи з великою кількістю датчиків для оцінки дорожнього покриття запропонована в [38]. Роботизована система оснащена кількома датчиками неруйнівного контролю та має здатність збирати дані в реальному масштабі часу та обробляти їх у квазіреальному часі. Наведено метод об'єднання датчиків, який успішно мінімізує час їх перевірки при виконанні контролю областей, що вимагають збирання більш детальних даних.

А. Навіб та його колеги [39] представили всебічний огляд сучасних роботизованих платформ, датчиків та алгоритмів, які були розроблені для огляду та оцінки мостів та цивільної інфраструктури загалом. У цьому огляді розглянуто деякі з останніх розробок у галузі автономних роботизованих платформ для неруйнівного контролю та моніторингу стану конструкції мостів. Автори відзначають три основні напрями досліджень. Перше відноситься до розробки технологічних роботизованих платформ, друге дослідження спрямоване на використання безлічі датчиків для цих платформ і третє – розробка алгоритмів та методів обробки та злиття інформації, отриманої від безлічі датчиків. Методи злиття були поділені на чотири групи:

1. Злиття на рівні даних – необроблені дані з різних датчиків перетворюються і об'єднуються разом.
2. Злиття на рівні функцій – елементи з мультимодальних даних зіставляються разом.
3. Злиття на рівні класифікатора – кілька різних класифікаторів використовуються разом для розробки гібридних класифікаторів.
4. Злиття на рівні результатів – для індивідуального аналізу даних із індивідуальних датчиків.

Поєднання датчиків у системах дозволяє підвищити ефективність отримання інформації. Методи злиття датчиків підвищують загальну

точність, а також знижують обсяг даних. До проблем, що виникають під час розробки роботизованих платформ з мультисенсорними системами, автори відносять великі витрати часу та ресурсів, які не завжди призводять до бажаних результатів.

Висновки

Теми, які обговорювалися у цій статті, пов'язані з автоматизованими методами виявлення та класифікації пошкоджень дорожнього покриття. Найбільш популярними на сьогодні можна вважати методи НК (ІЧТ, георадар, LiDAR та ін.). Кожен з методів має свої переваги та недоліки, але вони мають загальну проблему – необхідність в автоматизації обробки й аналізу зображень та їх інтерпретації.

Спостерігається тенденція поєднання методів НК з нейронними мережами, що дає можливість використання сучасних методів машинного навчання для автоматизації обробки та оцифрування даних та використання цих даних для створення надійних моделей, які можуть навчатися. Використання комбінованих методів зі штучним інтелектом дозволяє звузити певні обмеження у використанні методів НК, підвищити їх ефективність та проводити класифікацію дефектів, що може стати основою для створення надійних систем керування дорожніми покриттями.

Також в статті приділяється увага роботизованим платформам, які були розроблені для неруйнівного контролю. Використання таких систем дозволяє здійснювати автономний збір даних та надає можливість аналізу даних практично в реальному часі. З досягненнями в галузі розробки більш чутливих датчиків зображення та комп'ютерних технологій, стало можливим реалізація різних методів об'єднання датчиків з розробкою автономних роботизованих систем для неруйнівного контролю об'єктів. Поєднання датчиків у системах дозволяє підвищити ефективність отримання інформації, збільшити загальну точність, а також знизити обсяг даних. З іншого боку, може бути складною спільна обробка даних через різноманітність даних та придатність спільного додатку.

Подальші дослідження у цій сфері можуть бути направлені на розвиток методів інтеграції різних датчиків у роботизовані системи, об'єднанні даних та розробки нових алгоритмів для їх опрацювання.

Список літератури:

1. AASHTO (2009). *Rough Roads Ahead: Fix Them Now or Pay for it Later*. Joint publication of the American Association of State Highway and Transportation Officials and National Transportation Research Group, Washington, DC.

2. ДСТУ 8954 (2019). Автомобільні дороги. Оцінювання рівня дефектності дорожнього одягу.
3. Dare P. et al. An operational application of automatic feature extraction: The measurement of cracks in concrete structures." *Photogramm. Rec.*, 2002, 1799, 453–464.
4. Georgopoulos A, Loizos A, Flouda A. Digital image processing as a tool for pavement distress evaluation. *J Photogramm Remote Sens.*, 1995, 50(1):23–33.
5. Koutsopoulos H, El Sanhoury I. Methods and algorithms for automated analysis of pavement images. *Pavement Management: Data Collection, Analysis, and Storage*, 1991, (1311).
6. Oliveira H., Correia P. Automatic road crack detection and characterization. In: *Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2013, 14(1). IEEE, pp 155–168.
7. Zalama E., et al. Road Crack Detection Using Visual Features Extracted by Gabor Filters. *Computer-Aided Civil Infrastructure Eng.*, 2014, 29(5):342–358
8. Hutchinson T, Chen Z Improved image analysis for evaluating concrete damage. *J Comput Civil Eng.*, 2006, 20(3):210–216
9. Ouyang A., Luo C., Zhou C. Surface distresses detection of pavement based on digital image processing. *Computer and Computing Technologies in Agriculture IV*, 2011, pp 368–375.
10. Chen Z. et al. Roadatlas: Intelligent Platform for Automated Road Defect Detection and Asset Management. *ATM Multimedia Asia*, 2021, 1–3.
11. Yusof, N. A. M., et al. Deep convolution neural network for crack detection on asphalt pavement. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1349. No. 1. IOP Publishing,
12. Pauly L., Peel H., Luo S., Hogg D. and Fuentes R. Deeper Networks for Pavement Crack Detection 34th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2017) p. 479–485.
13. Yuchuan Du., et al. Pavement distress detection and classification based on YOLO network, *International Journal of Pavement Engineering*, 2021, 22:13, 1659-1672, DOI: 10.1080/10298436.2020.1714047.
14. Сторожик Д.В., Протасов А.Г. та ін. Автоматизація процесу теплового неруйнівного контролю шляхом застосування методу комплексування термограм. Технічна діагностика і неруйнівний контроль, 2022, №2, ст. 20-23. <https://doi.org/10.37434/tdnk2022.02.03>.
15. Sham J. F., Memon S. A., and Lo Y. Application of continuous surface temperature monitoring technique for investigation of nocturnal sensible heat release characteristics by building fabrics in Hong Kong," *Energy buildings*, 2013, vol. 58, pp. 1-10.
16. Caracelas M., Lagüela S., Gonzales H. and Arias P. Approach to identify cracking in asphalt pavement using GPR and infrared thermographic methods: Preliminary findings *NDT&E Int.*, 2014, 62 pp 55-65.
17. Janků Michal, and Josef Stryk. Application of infrared camera to bituminous concrete pavements: measuring vehicle. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, vol. 236. No. 1. IOP Publishing.
18. Pascucci S., et al. Road asphalt pavements analyzed by airborne thermal remote sensing: preliminary results of the Venice highway. *Sensors*, 2008, 8(2):1278–1296.
19. Clark M., McCann D., Forde M. Application of infrared thermography to the non-destructive testing of concrete and masonry bridges. *NDT E Int.*, 2003, 36(4):265–275.
20. Kulkarni N. N. et al. Comparative analysis of infrared thermography processing techniques for roadways' sub-pavement voids detection." *NDT & E International*, 2022, 129: 102652.33.
21. Wang Q., Xia R., et al. Pixel-based thermal sequence processing algorithm based on R2 fractile threshold of non-linear fitting in active infrared thermography, *Infrared Physics & Technology*, 2020, vol. 109, p. 103-122
22. Stimolo Marcello. Practical utilization of thermography in road construction and in waterproofing systems. *Thermosense XXIV*, 2002, vol. 4710. SPIE.
23. Juanyu Liu, Zollinger D., Lytton R. Detection of Delamination in Concrete Pavements Using Ground-Coupled Ground-Penetrating Radar Technique. *Geology. Transportation Research Record*, 2008. DOI:10.3141/2087-08.
24. Ciampoli L., Tosti F., Economou N. and Benedetto F. Signal Processing of GPR Data for Road Surveys. *Geosciences* 2019, 9(2), 96; <https://doi.org/10.3390/geosciences9020096>.
25. Joshaghani A. and Shokrabadi M. Ground penetrating radar (GPR) applications in concrete pavements, *International Journal of Pavement Engineering*, 2021, pp. 1-28. DOI: 10.1080/10298436.2021.1954182.
26. Wang S., Zhao S., Al-Qadi I.L. Continuous real-time monitoring of flexible pavement layer density and thickness using ground penetrating radar. *NDT E Int.* 2018, 100, 48–54.
27. Doler, D. Kovačič, B. Improved decision-making geo-information system for continuous monitoring of deformations on airport infrastructure. *Isprs Int. J. Geo-Inf.*, 2019, 8, 1.
28. Solla M., Pérez-Gracia V., and Fontul S. A Review of GPR Application on Transport Infrastructures: Troubleshooting and Best Practices, *Remote Sensing*, 2021, vol. 13, no. 4, p. 672.
29. Lato M., Diederichs M., Hutchinson D., Harrap R. Evaluating roadside rock masses for rockfall hazards using LiDAR data: optimizing data collection and processing protocols. *Nat Hazards*, 2012, 60(3):831–864.

30. Chang K., Chang J., Liu J. Detection of pavement distresses using 3D laser scanning technology. In: Proceedings of the 2005 ASCE International Conference on Computing in Civil Engineering.
31. Uddin W. Remote sensing laser and imagery data for inventory and condition assessment of road and airport infrastructure and GIS visualization. *Int J Roads Airports*, 2011, 1(1):53–67.
32. Su Y., Kang S., Chang J., Hsieh S. Using dual lights for robotic pavement inspection. In: Proceedings of SICE Annual Conference, 2010, vol 1.
33. Bystrov A. et al. Sensors for automotive remote road surface classification. *IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety*, 2018.
34. Fangyu L., Liu J., and Wang L. Asphalt Pavement Crack Detection Based on Convolutional Neural Network and Infrared Thermography. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022.
35. Solla M., Lagüela S., González-Jorge H.; Arias P. Approach to identify cracking in asphalt pavement using GPR and infrared thermographic methods: Preliminary findings. *NDT E Int.*, 2014, 62, 55–65.
36. Elseicy A., et al. Combined Use of GPR and Other NDTs for Road Pavement Assessment: An Overview *Remote Sens.*, 2022, 14, 4336. <https://doi.org/10.3390/rs14174336>.
37. Сторожик Д.В. Муравйов О.В., Протасов А.Г. та ін. Комплексування мультиспектральних зображень як метод підвищення їх інформативності при бінарній сегментації / *KPI Science News № 2*, 2020, стр. 82-87.
38. Gibb S., La H.M., Le T. et al. Nondestructive evaluation sensor fusion with autonomous robotic system for civil infrastructure inspection. *J. Field Robot*, 2018 35, 988–1004.
39. Habib A. et al. Review of Non-Destructive Civil Infrastructure Evaluation for Bridges: State-of-the-Art Robotic Platforms, Sensors and Algorithms. *Sensors*, 2020, 3954, doi:10.3390/s20143954.

Protasov A.G., Storozhyk D.V. AUTOMATION TECHNOLOGIES OF ROAD SURFACE DIAGNOSTICS

Roads are the main transport system in any country, and in Ukraine they make up 169.5 thousand km, which is the largest object of critical infrastructure. Given that road surfaces are prone to wear and aging, effective and timely assessment of their condition becomes crucial to ensure the safety of the transportation system and to reduce excessive repair and maintenance costs. Therefore, the main idea of this work was the analysis of automated technologies for detecting and classifying road surface damage and determining the direction of further development of these technologies.

The article considers the use of some methods of non-destructive testing for automated detection and classification of road surface damage, their advantages and disadvantages are analyzed. Many researchers have used image processing techniques to automate the examination process and improve the quality and accuracy of examination results. Today, with the development of the theory and practical application of neural networks, there is a tendency to combine control methods with neural networks, which makes it possible to use modern machine learning methods to automate data processing and digitization. The next trend observed in the direction of automation of road surface condition monitoring is the development of multi-sensor robotic systems. The use of such systems allows for autonomous data collection and enables data analysis in almost real time. The article describes some of the latest developments in the field of autonomous robotic platforms for non-destructive inspection and monitoring of the condition of roads and bridge structures.

Key words: *image processing automation, non-destructive testing, road surface monitoring.*

Редько І.В.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Зилевіч М.О.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

РЕДУКЦІЙНЕ ПРОГРАМУВАННЯ ЗАДАЧ У ТЕХНОЛОГІЧНОМУ СЕРЕДОВИЩІ ПРОГРАМУВАННЯ

У статті обґрунтовано необхідність продуктивного осучаснення розуміння програмування, оскільки відповідно до традиційної індивідуально-суб'єктивної парадигми, останнє розглядається як інструмент досягнення мети при цьому програмістська діяльність є максимально суб'єктивізованою, і опирається на вміння та навички суб'єкта, який нотує програмне рішення у код за допомогою мов програмування. Мова програмування виступає лише засобом нотації наслідку і про ніяку реальну підтримку генезису програм тут не йдеться.

Показано, що застосування продуктивного редуційного програмування має ключову роль у технологізації програмування. Використання останнього дозволяє зменшити складність процесу розробки програмного продукту та збільшити продуктивність програміста. Крім того, редуційне програмування може бути використане для оптимізації коду та покращення його читабельності, що є прикладом технологізації програмування та покращенні якості програмного продукту.

Запропоновано нову парадигму програмування, що передбачає активну участь суб'єкта програмування, який розглядає програмування як діяльність, що визначається програмою. Семантика програмного продукту та його синтаксична нотація обумовлюються концептом редуції та мовою програмування, яку обирає суб'єкт програмування. Таким чином, активізація ролі суб'єкта програмування покращує процес розробки та якість програмного продукту.

Показано, що концепти програмування можуть бути використані як семантичні шаблони у програмному ланцюгу для побудови певних класів програм.

Використано програмний дефінітор для трансляції композитів та базових функцій у синтаксичне представлення в рамках технологічної системи програмування. За допомогою редуційного програмування було побудовано програмну специфікацію та згенеровано відповідний код програми. Коректність специфікації впливає з її конструкції.

Ключові слова: *концепт, монада, редуція, композиція, середовище та система програмування, суттєвостісного уподібнення, дескриптор.*

Постановка проблеми. Відповідно до традиційної, індивідуально-суб'єктивної парадигми, що асоціює програмування виключно з програмою, довгий час розуміння програмування виходило з того, що домінуючим є його наслідок, який частіше за все трактувався як текст у тій чи іншій мові програмування. Саме ж програмування розглядалося як інструмент досягнення мети. В такій парадигмі програмістська діяльність є максимально суб'єктивізованою, і опирається на вміння та навички суб'єкта, який нотує програмне рішення у код за допомогою мов програмування. Тобто, мова програмування виступає лише засобом нотації наслідку програмування. Таким чином про ніяку реальну підтримку генезису програм тут не йдеться. Серед усіх відомих причин такого

положення, на нашу думку, основною є занадто спрощене розуміння програмування, що не відповідає сучасним вимогам. Тому продуктивне осучаснення розуміння програмування є необхідною умовою реальної підтримки програмування.

В [1] обґрунтовано, що врахування активної ролі суб'єкта у такому осучасненні є засадничим. Ключову роль у цьому відіграє наступне основоположення: програмування це діяльність, обумовлена програмою та націлена на створення програми.

Таке розуміння програмування хоча й відрізняється від традиційного своєю спрямованістю на взаємодоповнення процесу програмотворення та його результату, разом з тим є поки що надто аморфним і потребує тому подальшого продуктив-

ного збагачення. Пропонована інтерсуб'єктивна парадигма [2] виходить з тлумачення терміну програми як подоби (наряду, як результату уподібнення) суттєвої риси. У [3-5] обґрунтовано, що таке трактування є, по-перше, цілком відповідним сучасній прагматиці програмування, по-друге, дозволяє здійснити подальше продуктивне збагачення програмування. Безпосередньо програмування розуміється як взаємодоповнення двох об'єктивно незвідних один до одного модального та реального (актуального) типів абстракцій – сутності – того, що може бути предметом розгляду, та суті – об'єкту розгляду, у сенсі того, що суть це сутність, що є (у наявності). Таким чином, отримуємо продуктивне збагачення вихідного основоположення: програмування (продуктивне) – діяльність, обумовлена програмним уподібненням (ПрУ). Тут ПрУ – обумовлене програмою та націлене на створення програми продуктивне збагачення суттєвості уподібнення (ССУ). Зміст ПрУ у першому наближенні полягає у орієнтованому на створення програми як подоби сутності взаємодоповнення сутності та суті. Останнє, з огляду на згадану об'єктивну незвідність цих типів абстракції, вимагає залучення у цей процес суб'єкта з урахуванням (об'єктивізацією) його активної ролі у цьому. З зазначеного вище випливає важливість та необхідність розвитку інтерсуб'єктивного розуміння програмування, оскільки воно є запорукою реальної технологізації програмування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Практика програмування свідчить про домінування парадигми «розділяй і володарюй» при вирішенні задач. І основним прийомом тут є редукція, цілісне розуміння якої зводиться до загального методичного прийому – зведення складного до простішого [6]. Тому, роль продуктивних редукційних механізмів є засадничою для технологізації програмування. В [1, 6-8] обґрунтовано, що основу таких збагачень складає концептопрограмне активно-пасивне взаємодоповнення:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{концепт} = \text{суть, що обумовлює сутність} \\ \text{програма} = \text{сутність, що обумовлюється концептом} \end{array} \right.$$

В роботах [9-11], концептопрограмна платформа забезпечує реальну об'єктивізацію головного чинника продуктивної технологізації – активної ролі суб'єкта програмування. Здійснюється продуктивне збагачення програмного уподібнення як спеціального виду активно-пасивного причино-наслідкового зв'язку та його релятивізація – основний чинник продуктивної технологізації. Відповідно, технологічне середовище про-

грамування доцільно розглядати як продуктивне збагачення згаданої концептопрограмної платформи програмних уподібнень до активно-пасивного взаємодоповнення двох об'єктивно незвідних один до іншого типів абстракції: замкненої оракульної логіки – цілісного ядра середовища програмування та відкритого різноманіття її продуктивних програмних уподібнень – технологічних систем програмування. Тобто будь-яка технологічна система програмування є наслідком програмної релятивізації і носієм продуктивного розуміння редукції. Це забезпечує реальне врахування активної ролі суб'єкта програмування.

Необхідність технологізації діяльності, осучаснення методів та способів її здійснення на пряму визначається рівнем потреби в об'єктивуванні участі суб'єкта у ній. У сфері програмування це проявляється у зростанні вимог до програмних продуктів та в усвідомленні того, що головні властивості останніх формуються стадії їх генезису і як наслідок визначаються активною роллю суб'єкта у ньому [12].

Визначальні основоположення розуміння технології програмування формуються на основі принципів обумовлення, підпорядкованості та відокремлюваності [4, 5]. З вказаних принципів слідують аспекти програм у їх взаємодоповненні. Цим обумовлюється точка зору на те, як повинна виглядати продуктивна технологія програмування (ТП), щоб її продукт відповідав цим принципам вимогам. Зокрема, ці принципи на загальному рівні чітко окреслюють місце та роль продуктивного програмування в технології програмування

У [1, 5, 6, 8] вирішення будь-якої програмістської задачі представлена як послідовність виконання певних етапів, серед яких виділяється концептування через взаємодію оракулів. Схематизація оракулів та відповідно композитні обумовлення. Завершальним є редукціювання (редукційне концептування) яке є продуктивним саме у прагматиці технологізації програмування. Таким чином, показно, що в цілому етап програмування в технології програмування складається з сукупності визначених кроків. Сукупність таких кроків визначає завершення стадії програмування, останнім серед яких є редукціювання. На ньому доцільно заценувати більше уваги, оскільки воно безпосередньо передуює етапу кодування.

Постановка завдання. Метою роботи є демонстрація технологічної системи програмування (ТСП) як платформи осучасненого редукційного програмування та застосування її для вирішення репрезентативних задач.

Виклад основного матеріалу дослідження. Програмування обумовлене суб'єктно-орієнтованим замиканням ТСП до суб'єкто-орієнтованої платформи програмування. Замикання являє собою визначення композитів як концептів програмування, базових предметних операцій та композито-композиційних інтерфейсів. Для демонстрації на прикладі побудуємо арифметичну ТСП. Композиційне програмування використовуємо як платформу програмування, разом із іменною моделлю даних, функцій і операцій. Композитами будуть операції мультиплікування \circ , розгалуження IF , циклування WD і найпростіші похідні від них композиції (у сенсі операцій аплікації A_p та n -арної суперпозиції $S^n|_{n \in N}$), що уточнюють найбільш вживані способи синтезу одних програм з інших [13-15], а в якості базових предметних операцій – арифметичні операції $+$, $-$, 0 ; логічні операції \vee , \wedge , $!$, T , F ; відношення $=$, \langle, \rangle ; функція слідування $s(n) = n + 1|_{n \in N}$. Також знадобляться параметричні операції над іменними даними – іменування $A_\downarrow : A_\downarrow(a)|_{a \in N} = \{(A, a)\}$, розіменування $A^\uparrow : A^\uparrow(\{(A, a)\}|_{a \in N}) = a$ і відкриваюча та закриваюча дужки.

Надалі, під даними, функціями та операціями, якщо не зазначено інше, розуміємо іменні дані, іменні функції та іменні операції, відповідно. Композито-композиційний інтерфейс, визначається композитами апарату послідовної або \circ -, галужевої або IF - та циклічної або WD -редукцій (див.[2, 4, 5] та бібліографію). Кортеж функцій $\langle f_1, f_2, \dots, f_s \rangle$ є \circ -редукцією функції f , якщо він є рішенням рівняння $f = x_1 \circ x_2 \circ \dots \circ x_s$, тобто $f \equiv f_1 \circ f_2 \circ \dots \circ f_s$. Пара функцій f_1, f_2 є IF -редукцією функції f , якщо існує такий предикат p , що ця пара є рішенням рівняння $f = IF(p, x_1, x_2)$, тобто $f \equiv IF(p, f_1, f_2)$. Також, функція g є WD -редукцією функції f , якщо існує такий предикат p , що g є рішенням рівняння $f = WD(x, p)$, тобто $f \equiv WD(g, p)$ [6, 9]. З останнього безпосередньо впливає корисна необхідна умова WD -редукційності.

Теорема. Для того, щоб функція g була WD -редукцією функції f необхідно, щоб виконувалась наступна рівність $g \circ f = f$.

Після побудови технологічної системи, продемонструємо спосіб програмування у ній на прикладі програмування функції цілочисельного ділення. Програмування проводитимемо виходячи з наступної властивості функції: $\forall a, b, c|_{a, b, c \in N} \text{div}(a, b) = c$, де div – функція цілочисельного ділення натуральних чисел, а саме: $\text{div} : N \times N \rightarrow N$, де $\text{div}(a, b)$, таке натуральне число, що $b \times \text{div}(a, b) \leq a \leq b \times (\text{div}(a, b) + 1)$.

Враховуючи зорієнтованість описаної ТСП на іменні структури даних, збагатимо функцію її іменною специфікацією у вигляді іменної функції $DIV : \{(A, a), (B, b)\} \rightarrow \{(C, c)|_{a, b, c \in N}$. $DIV : \{(A, a), (B, b)\} \rightarrow \{(C, \text{div}(a, b))|_{a, b, c \in N}$.

Тобто, $DIV \equiv F_1 \circ F_2$. Дана специфікація є оракульною схемою [6], обумовленою композитом мультиплікування. З її іменної специфікації випливає, що F_1, F_2 , де $F_1 = 0(C^\uparrow) \circ C_\downarrow \equiv \{(C, 0)\}$, $F_2 : \{(A, a), (B, b), (C, c)\} \rightarrow \{(A, a - k \times b), (B, b), (C, c + \text{div}(a, b))\}$, де $a, b \in N, b \neq 0$, а $k : (k + 1) \times b < a < k \times b$. Тобто, $G \equiv F_1 \circ F_2$. Функції F_1 очевидно не потребує деталізації, оскільки є початковим обнулінням значення c . Функція F_2 є оракульною схемою [6], з властивості функції div випливає, що WD -редукцією функції DIV буде функція $G : \{(A, a), (B, b), (C, c)\} \rightarrow \{(A, a - b), (B, b), (C, c + 1)\}$, де $P : \{(A, a), (B, b)\} \rightarrow \begin{cases} T, \text{якщо } a \geq b \\ F, \text{якщо } a < b \end{cases}$ – іменна специфікація відповідного предикату. Тобто, $F_2 = WD(G, P)$. Очевидно, потрібно здійснити її програмування. Для цього скористаємось властивістю цієї функції:

$$\text{div}(a, b)|_{a, b \in N \& b > 0} = \begin{cases} \text{div}(a - b, b) + 1, a \geq b, \\ \text{div}(a, b) = 0, a < b \text{ або } a = 0 \end{cases}$$

Таким чином, F_2 виглядає так: $F_2 = WD((A_\downarrow(A^\uparrow - B^\uparrow)) \circ (C_\downarrow(C^\uparrow + 1))), P(A^\uparrow, B^\uparrow)$. Звідси, $DIV \equiv (0(C^\uparrow) \circ C_\downarrow) \circ (WD((A_\downarrow(A^\uparrow - B^\uparrow)) \circ (C_\downarrow(C^\uparrow + 1))), P(A^\uparrow, B^\uparrow))$.

Така спрощена форма запису обрана задля легшого розуміння виразу. Також у формулах наведених вище присутні метавирази які не є реальними виразами в описаному середовищі. Задля спрощення форми запису дані метавирази вирішено не розписувати. Описані метавирази знайдуть своє спеціальне відображення у відповідній таблиці дефінітора.

У результаті першої стадії технологізації, а саме редукційного програмування у заданій системі була отримана описана вище специфікація. З побудови програми впливає її коректність. Після отримання специфікації можливо провести кодування.

Значалося, що більшість мов програмування є лише засобами синтаксичної нотації результатів програмування. Технологія програмування близька по своїй суті до інтерпретованої мови та є імплементацією взаємодоповнення принципів програмування. За своєю суттю представляє собою суб'єкто-об'єкту технологію створення програмного продукту [16, 17]. Будь яку програму можна представити як мікроконвейер стадій, де стадія "програмування" реалізує підпорядкованість семантики прагматиці і результатом її є програма – обумовлений суб'єктом нарис рішення задачі у вигляді відповідного семантичного терму. [18, 19]. Стадія «кодування» – стосується синтаксичного аспекту

і результатом тут є код програми у вигляді синтаксично вірно записаного тексту у визначеній мові програмування. Для автоматизації процесу використовується відповідний дефінітор мови програмування. Застосуємо це до вище розглянутого прикладу програмування функції *DIV*.

Для спрощення, розглянемо тут лише невелику частину дефінітору Pascal-подібної мови програмування, яка є достатньою для демонстрації. У ньому представлені відповідні композити та функції з їх синтаксичними нотаціями Pascal-подібному вигляді (таб. 1 та 2).

У представлених таблицях позначення F , можливо з індексами, $F_i, i = 1, 2, 3, \dots$ і тільки вони використовуються у якості нетермінальних символів або нетерміналів. Аналогічно, термінальні символи X^\uparrow , X_\downarrow та X також можуть використовуватись з індексами: X_i^\uparrow , $X_{i\downarrow}$ та $X_i, i = 1, 2, 3, \dots$

Через них забезпечується рекурсивність побудов [20]. Концепти програмування та кодування представлені у табл. 1 представляють собою правильно записані слова у об'єднаному алфавіті термінальних символів та нетерміналів. У табл. 2 наведено термінальні символи для базових операцій та відповідні їм Pascal-подібні коди.

Звернемося до вищенаведеної програми. Використана раніше додаткова розмітка програми наочно демонструє притаманну їй ієрархічність структури. Вона обумовлена здійсненою покроковістю актуалізацій оракулів у системі програмування, починаючи від оракула *DIV* і закінчуючи вільним від оракулів композиційним термом. Рухаючись по цій ієрархії у відповідності до заданого у таблицях 1 та 2 фрагменту дефінітора рекурсивно будуємо Pascal-подібний код програми (див. табл. 3).

Висновки. У результаті проведеної роботи показано, що продуктивна редукція грає фундаментальну роль у забезпеченні технологізації програмування.

Обґрунтовано, що нова парадигма програмування має базуватися на активізації ролі суб'єкта програмування, у якому програмування розглядається як діяльність, детермінована програмою.

Підтверджено, що технологія програмування використовує редукційне програмування як засіб перетворення інформаційного ресурсу у програмний продукт у технологічному середовищі програмування. Обумовлена концептом редукція відіграє

засадничу роль у технологізації програмування. Концепт програмного продукту обумовлює семантику програмного продукту, а обумовлене програмою синтаксичну нотацію результатів програмування завершують однією з обраних суб'єктом програмування мовою програмування.

На репрезентативному прикладі продемонстровано використання концептів програмування у вигляді семантичних шаблонів як ланок програмного ланцюга, які обумовлюють певні класи програм. Використано програмний дефінітор, який виступає у ролі засобу трансляції композитів та базових функцій технологічної системи програмування у їх синтаксичні представлення.

За допомогою редукційного програмування у заданій системі була отримана програмна специфікація, коректність якої впливає з її побудови. На основі отриманої специфікації за допомогою дефініторів отримано код програми.

Таблиця 1

Шаблони програмування та кодування

Концепт (шаблони) програмування	Концепт (шаблони)кодування
...	...
$F, (F)$	F
$F_1^{\circ}F_2$	<i>begin</i> $F_1; F_2$ <i>end</i>
$IF(F_1, F_2, F_3)$	<i>if</i> F_1 <i>then</i> F_2 <i>else</i> F_3
$WD(F_1, F_2)$	<i>while</i> F_2 <i>do</i> F_1 <i>end</i>
$F^{\circ}X_1$	$X := F$
$X^{\uparrow}S \quad X^{\uparrow}S^{\circ}Y_1$	$X^{\uparrow} + 1 \quad Y := X + 1$
$P(A^{\uparrow}, B^{\uparrow})$	$(A > B)$ <i>or</i> $(A = B)$
$F_1 [F_2]$	$F_1 ; F_2$
meta $\begin{bmatrix} 0(C^{\uparrow}) \\ A_{\downarrow}(A^{\uparrow} - B^{\uparrow}) \\ C_{\downarrow}(C^{\uparrow} + 1) \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0(C) \\ A := A - B \\ C := C + 1 \end{bmatrix}$
...	...

Таблиця 2

Кодування базових функцій

Базові функції	Коди базових функцій
...	...
0	0
+	+
-	-
\wedge	<i>and</i>
\vee	<i>or</i>
!	<i>not</i>
<	<
=	=
>	>
X^{\uparrow}	X
X_{\downarrow}	X
...	...

Шаблони програмування та кодування

Програма	Використовувані шаблони	Актуалізації нетерміналів
$DIV \equiv (0(C^\dagger)^\circ C_1)^\circ (WD((A_1(A^\dagger - B^\dagger))^\circ (C_1(C^\dagger + 1))), P(A^\dagger, B^\dagger))$	$F_1 \circ F_2$	$F_1 \Leftarrow 0(C^\dagger)^\circ C_1$ $F_2 \Leftarrow WD((A_1(A^\dagger - B^\dagger))^\circ (C_1(C^\dagger + 1))), P(A^\dagger, B^\dagger)$ $DIV \Leftarrow begin F_1; F_2 end$
$F_1 \equiv 0(C^\dagger)^\circ C_1$	$F_1 \circ F_2$ X^\dagger X_1	$F_{11} \Leftarrow 0(C)$ $F_{12} \Leftarrow C_1$ $F_1 \Leftarrow begin F_{11}; F_{12} end$
$F_2 = WD((A_1(A^\dagger - B^\dagger))^\circ (C_1(C^\dagger + 1))), P(A^\dagger, B^\dagger)$	$WD(F_1, F_2)$	$F_{21} \Leftarrow (A_1(A^\dagger - B^\dagger))^\circ (C_1(C^\dagger + 1))$ $F_{22} \Leftarrow P(A^\dagger, B^\dagger)$ $F_2 \Leftarrow while F_{22} do F_{21} end$
$F_{21} \Leftarrow (A_1(A^\dagger - B^\dagger))^\circ (C_1(C^\dagger + 1))$	$F_1 \circ F_2$ (F) X^\dagger X_1	$F_{31} \Leftarrow A_1(A^\dagger - B^\dagger)$ $F_{32} \Leftarrow C_1(C^\dagger + 1)$ $F_{21} \Leftarrow begin F_{31}; F_{32} end$
$F_{22} \Leftarrow P(A^\dagger, B^\dagger)$	$meta P(F_1, F_2)$	$F_{22} \Leftarrow (A > B \text{ or } A = B)$
$F_{31} \Leftarrow A_1(A^\dagger - B^\dagger)$	$meta A_1(A^\dagger - B^\dagger)$ (F)	$begin$ $F_{31} \Leftarrow A := A - B$ end
$F_{32} \Leftarrow C_1(C^\dagger + 1)$	$meta C_1(C^\dagger + 1)$ (F)	$begin$ $F_{32} \Leftarrow C := C + 1$ end
$DIV \equiv F_1 \circ (WD(F_{21} \circ F_{22}))$	$F_1 \circ F_2$ $WD(F_1, F_2)$ $meta C_1(C^\dagger + 1)$ $meta A_1(A^\dagger - B^\dagger)$ $meta P(F_1, F_2)$ (F)	$begin$ $while (A > B \text{ or } A = B) do$ $begin$ $F_{31} \Leftarrow A := A - B$ $F_{32} \Leftarrow C := C + 1$ end $DIV \Leftarrow F_{32}$ end

Список літератури:

1. І.В. Редько, П.О. Яганов “Концептуальна модель технологічного середовища програмування”, *Наукові вісті КНУ*, № 1, с. 18-26, 2020.
2. E. G. Husserl, “Logical Studies. Cartesian Reflections”, Minsk, Belarusia, 2000.
3. I. Redko, “Pragmatic foundations of descriptive environments”, *Programming issues*, no 3, pp 2-25, (in Russian), 2005.
4. I. Basarab, N. Nykytchenko, V. Redko. “Composite databases”. Kyiv: Lybid , 1992. p. 192.
5. I. V. Redko, D. I. Redko, T. L. Zakharchenko, “Conceptual basis of programming,” Kyiv, Ukraine: Kompynt, 2016.
6. І.В Редько, П.О. Яганов, М.О. Зилевіч, "Редукційне концептування оракульних схем", *Системні дослідження та інформаційні технології*, №1, с.21-33, 2021.
7. I. Redko, P. Yahanov and M. Zylevich, "Concept-Monadic Model of Technological Environment of Programming," 2020 IEEE 2nd International Conference on System Analysis & Intelligent Computing (SAIC), Kyiv, Ukraine, 2020, pp. 125-130.
8. Літературознавча енциклопедія : у 2 т.авт.-уклад. Ю. І. Ковалів. Київ : ВЦ «Академія», 2007. Т. 2 : М–Я. С. 309–310.
9. Редько В.Н. *Дескриптологические основания программирования. Кибернетика и системный анализ.* 2002. № 1. С. 3–19.
10. Редько В.Н. *Основания дескриптологии. Кибернетика и системный анализ.* 2003. № 5. С. 16–36.
11. Редько В.Н., Редько И.В., Гришко Н.В. *Дескриптивные системы: концептуальный базис. Проблемы програмування.* 2006. № 2–3. С. 75–80.
12. В.Н. Редько “Композиции программ и композиционное программирование”, *Программирование*, № 5, с. 3-24, 1978.
13. В.Н. Редько “Дефиниторы и метод дефиниторного процессирования”, *Кибернетика*, № 6, с. 52-56, 1974.
14. И. А. Басараб , Н. С. Никитченко, В.Н. Редько, *Композиционные базы данных.* – К.:Льбидь, 1992.
15. В.Н. Редько, “Основы програмологии”, *Кибернетика и систем. анализ*, № 1, с. 35-57, 2000.
16. В.Н. Редько, “Основы композиционного программирования”, *Программирование*, № 3, с. 3-13, 1979.

17. В.Н. Редько, Н.В. Гришко, И.В. Редько, “Экспликативное программирование в среде логико-математических спецификаций”, УкрПРОГ98, с.71-76, 1998.
18. И.В. Редько, Н.В. Гришко, “Экспликативное программирование в среде интеграции”, Проблемы программирования, №2, с.59-65, 2004.
19. D. I. Redko, I. V. Redko, P. O. Yahanov and T. L. Zakharchenko, "Compositional basis in programmer activity," Системні дослідження та інформаційні технології, no. 4, pp. 83-96, 2015.
20. И.В. Редько, “Прагматические основания дескриптивных сред”, Проблемы программирования, №3, с.3-25, 2005.

Redko I.V., Zylevich M.O. REDUCTIVE PROGRAMMING OF PROBLEMS IN A TECHNOLOGICAL PROGRAMMING ENVIRONMENT

The article substantiates the need for a productive modernization of the understanding of programming. According to the traditional individual-subjective paradigm, programming is considered a tool for achieving the goal, with maximally subjectivized and relies on the skills and abilities of the person who notes the software solution in code using programming languages. The programming language acts only as a means of notation of the consequence and there is no real support for the genesis of programs here.

The fundamental role of productive reduction in the technologization of programming is shown. It is justified that the new paradigm of programming should be based on the activation of the role of the programming subject, in which programming is considered an activity determined by the program.

It is confirmed that programming technology uses reductive programming as a means of transforming an information resource into a software product in a technological programming environment. The reduction plays a fundamental role in the technologization of programming. The concept of the software product determines the semantics of the software product and the syntactic notation of the programming results determined by the program.

A representative example demonstrates the use of programming concepts in the form of semantic templates as links in a program chain that determine certain classes of programs. A software definer is used, which acts as a means of translating composites and basic functions of the technological programming system into their syntactic representations.

With the help of reductive programming, a program specification was obtained in the given system, the correctness of which follows from its construction. Based on the received specification, the program code is obtained with the help of definers.

Key words: *concept, monad, reduction, composition, environment and system of programming, essence likeness, descriptor.*

Sarnatskyi V.V.

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

Baklan I.V.

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

CTRACEENV: A PLATFORM FOR DEVELOPMENT AND ANALYSIS OF AGENT-BASED EPIDEMIOLOGICAL MODELS USING CTRACE LANGUAGE

Over the past few years, epidemiological modeling has become an increasingly crucial aspect of controlling and managing infectious diseases. One of the most promising approaches for modeling infectious disease dynamics is agent-based models (ABMs), which offer a detailed and flexible framework for simulating disease transmission in populations. In this study, we describe our efforts to create an environment that simplifies the development and analysis of ABMs for epidemiological modeling. Our approach is based on the use of a CTrace modeling language, which provides tools for defining ABMs with contact tracing transmission.

Our approach is centered around the CTrace modeling language, which offers an intuitive syntax for defining ABMs with contact tracing transmission. With the language's user-friendly tools, modelers can specify the individual agents in a population, their interactions, and how the disease spreads among them. Furthermore, the language's compiler is capable of generating software libraries, which we successfully utilized in the environment we developed.

To assist the development of ABMs using CTrace, we have designed an environment that facilitates the integration of the language with external tools. The environment includes an intuitive user interface that guides users through the process of defining the model and running simulations. Additionally, one of the environment's key features is its capability to perform basic analysis of the model, such as displaying epidemic statistics over time. This information can then be exported for further analysis using external tools like R or Python.

Our study highlights the importance of creating user-friendly environments that simplify the development and analysis of ABMs for epidemiological modeling. The use of CTrace modeling language and the developed environment offers a powerful and efficient tool for researchers to simulate disease transmission and investigate the effectiveness of various control strategies. As such, our approach may prove invaluable in the development of more accurate and effective models for managing infectious diseases.

Key words: *epidemiology, modeling, agent-based, software, modeling environment.*

Introduction. Since the early days of human civilization, infectious disease outbreaks caused significant damage to the population [1, p. 1; 2, p. 21; 3, p. 150]. For example, the ongoing COVID-19 pandemic of SARS-CoV-2 virus [4, p. 536] caused death of over 6.8 million people as on March 2023. Apart from human casualties, the economic impact of such global pandemics can also be devastating [5, p. 1].

In order to lower the impact of these events, active disease spread prevention measures must be taken. These include obligatory face mask regime, vaccination, partial quarantine, etc. But, too strict quarantine can have significant impact on the economy as, for example, workers of critical infrastructure must remain at their workplace. Finding this point of equilibrium between epidemiological and economical damage requires powerful and representative models,

the development of which is complicated due to the size and complexity of the target environment.

The modeling software tools can be a solution to this problem, as they can significantly simplify the development of epidemiological model by exposing easy-to-use human interface and untying model computational performance from user's experience in programming. The development of powerful, performant and flexible tools for epidemiological modeling became a hot topic with the rapid advance in available computational power and accumulated amounts of statistical data.

The main contributions of this paper are summarized as follows:

- This paper reviews the current state of ready-to-use epidemiological modeling environments;
- The epidemiological modeling and analysis tool, based on a domain-specific programming language was developed;

• The computational performance of the developed tool was compared to the existing ones.

Task statement. The aim of this research is to develop an epidemiological modeling and analysis environment, based on CTrace modeling language; compare the developed solution to the existing ones.

Analysis of recent research and publications.

In this section, we describe our findings on existing tools and methods of epidemiological modeling. These tools can be divided into three distinct groups:

- Programming languages, modules/libraries;
- Specialized software for epidemiological modeling;
- General-purpose modeling environments.

We review each group separately.

Programming language modules/libraries

Kendrick [6, p. 1] is both a domain-specific programming language and environment for compartmental epidemiological models development and analysis. The language allows one to develop a model utilizing domain-specific abstractions such as disease, transmission rules, compartments, etc. For example, the following listing, provided by the authors, defines a model for measles disease:

```
KendrickModel SEIR
attribute: #(status -> S E I R);
parameters: #(beta lambda gamma sigma mu );
transitions: #(
S -- lambda --> E.
E -- sigma --> I.
I -- gamma --> R.
status -- mu --> Empty.
Empty -- mu --> S.
).
```

Composition Measles model: 'SEIR'.

Scenario MeaslesParameters

on: 'Measles';
beta: 0.0000214;
gamma: 0.143;
mu: 0.0000351;
sigma: 0.125;
lambda: #(beta*I).

Scenario MeaslesPopulation

on: 'Measles';
populationSize: 100000;
S: 99999;
I: 1;
others: 0.

These models can be developed and analyzed using Kendrick modeling platform (Fig. 1), which provides syntax highlighting, model simulation results.

Even though Kendrick can be related to the second group, we think that the language is the main contribution of the research.

Swarm [7, p. 1] is a set of libraries for Java programming languages which defines a model as a set of interacting agents, dynamics of their evolution and the schedule of events. This package is no longer maintained and has its successor — Ascape [8, p. 212], which was simplified from the perspective of programming interface. Ascape also delivers a simple graphical interface for model adjustments and inspection and spreadsheet data export.

Specialized software for epidemiological modeling

FluTE [9, p. 1] is a software component implemented in the C/C++ programming language,

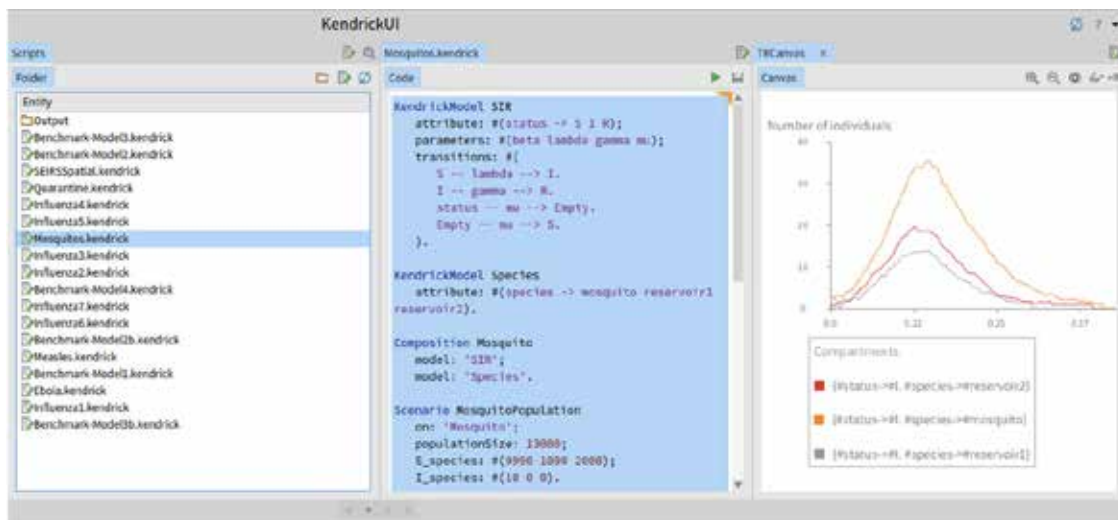


Fig. 1. Kendrick modeling platform interface

built on the top of the agent-based epidemiological model. FluTE models a typical American society divided into communities of 500-3000 people. Each community is represented by families with 1-7 people in each, living in private houses. At night, relatives come in contact with each other, as well as with other members of their community, contributing to the spread of the disease. During the day, children visit educational institutions assigned to each community and interact with other children in their study groups. Preschool children come into contact with other children by playing with them on playgrounds. During this time, busy adults visit workplaces assigned to their own or neighboring communities, making contact with their colleagues there. Both adults and children can join short-term trips that simulate vacations and other trips. The process of introducing a disease into society occurs through the infection of a random group of the population at the beginning of the simulation, or every day. All data, from the age distribution of individuals to the distribution of the number of nights a person spends on vacation, is built based on the statistical data of the society of the United States of America.

Infection occurs through contact tracing, with the probability of person-to-person transmission calibrated to disease incidence data for H1N1 and H2N2 virus subtypes. The software component corresponds to a configuration file that allows you to parameterize the model.

The authors used FluTE to model the spread of influenza within the city of Seattle and throughout the United States. Figure 2 presents the simulation results according to FluTE.

Global Epidemic and Mobility (GLEaM) and the corresponding analysis environment — GLEaMvis

[10, p. 1] is a software complex with client-server architecture for creating, configuring and analyzing compartment models. It consists of three main components: a custom software component, an intermediate service, and a simulation engine. The first of them provides the user with the ability to configure the compartments in detail, the connections between them, the details of the simulation, and view analytics on the results of the model. Figure 3 shows the user interface of the compartment model builder, figure 4 shows the simulation setup steps. The intermediate service and the simulation engine are responsible for interaction with the client software component and the operation of the epidemiological model. The compartmental model underlying GLEaMvis consists of three layers: population, mobility, and epidemiology. The first layer is statistical data on the population in the form of a grid with a grid step of 15 arc minutes. The mobility layer is suitable for modeling population movements over both short and long distances. The epidemiological layer simulates the dynamics of the spread of an infectious disease within individual communities according to the compartment model specified by the user.

GLEaMvis provides the user with the opportunity to view detailed statistics on the model's performance in visual visualization, an example of which is shown in figure 5.

Spatiotemporal Epidemiological Modeler (STEM) [11, p. 134] is an environment for modeling the spread of infectious diseases implemented in the Java programming language. The STEM epidemiological model use graphs to represent geographic locations and traffic flows between them. Using the built-in graph editor (figure 6, the user can create a mobility layer of the developed model. This layer can include several

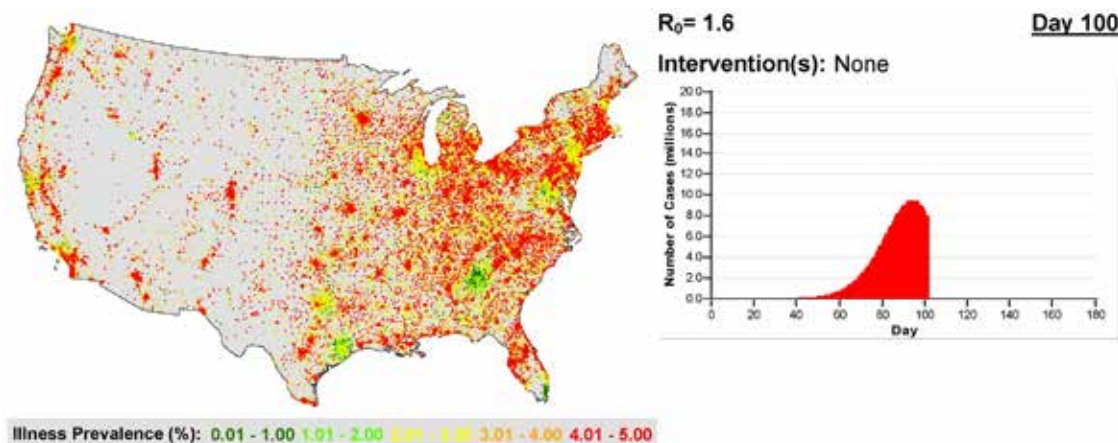


Fig. 2. Distribution of the virus within the territory of the United States according to FluTE. The color indicates the spread of the disease

graphs, each of which can correspond, for example, to different types of transport. The built-in editor of a set of compartments and connections between them allow one to develop custom compartmental models. For analytical purposes, STEM allows one to visualize the process of the spread of an infectious disease on a geographic map of the modeling area.

The Framework for Reconstructing Epidemic Dynamics (FRED) [12, p. 1] uses an agent-based model to simulate the spread of infectious diseases. Similar to FluTE, this method is characterized by deep modeling of the sociodemographic structure of the population, taking into account such features of each agent as gender, age, race, employment, etc., to use them in the modeling of daily movements and the development of the disease. As part of the movements, the agent visits certain institutions on a daily basis, where he comes into contact with other agents, contributing to the spread of the disease. And although the user does not have the ability to edit existing and add new types of these institutions, FRED allows you to configure the rate of infection of agents for each of them.

General-purpose modeling environments

NetLogo [13, p. 1] is modeling environment, consisting of the following elements:

- Subject-oriented programming language, used for describing agents behavior, their inner states evolution and interactions between each other;
- Tool set for the analysis of experiments data as the result of modeling.

Overall, NetLogo allows one to flexibly define models, but this flexibility comes with certain limitations. First of all, as showed in [14, p. 1], the overall performance of NetLogo simulation engine is significantly lower, compared to similar models implemented using other tools. NetLogo features fixed modeling space geometry in the form of rectangular grid, where each agent is “attached” to a certain cell of it and can interact with agent on adjacent cells. Despite the interaction of agents positioned far from each other can be implemented, it is not supported internally, can be cumbersome and limits computational performance of a simulation.

RePast [15, p. 1] is a software tool set, designed for modeling of complex systems. There are several implementations of it, based on different programming languages such as Java, C++. Repast also features an implementation, suitable for high-parallel environments [16, p. 1215].

Main research materials. CTrace [17, p. 426] is a domain specific programming language for an agent-based epidemiological modeling. It offers simple syntax together with powerful semantics, allowing

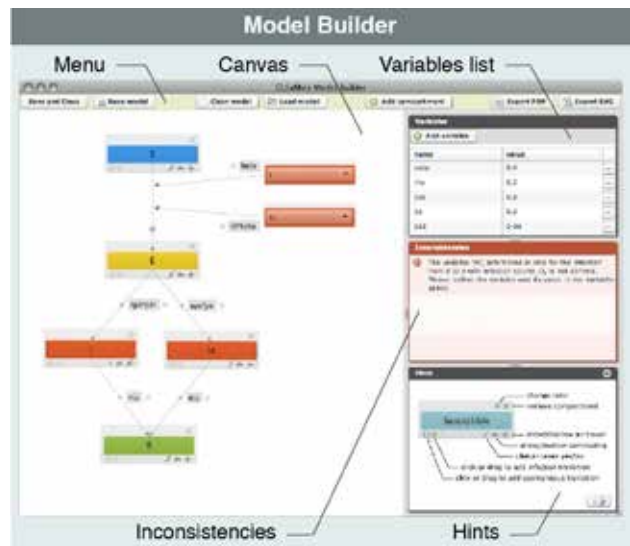


Fig. 3. User interface of the tool for building a compartmental model by specifying compartments, relationships between them and parameters in the GLEaMvis modeling environment



Fig. 4. The user interface of the simulation setup tool in the GLEaMvis environment. a - simulation type selection window; b - compartment model selection window; c - window for setting simulation parameters; d - window for setting the initial size of the compartments; e - window for configuring the geography of the epidemic; f - a window for selecting compartments for presentation in analytics

one to research, develop and analyze epidemiological models quickly without requiring strong knowledge in programming and computer science. Its compiler is designed in a way to output Python module as translation artifact, which exposes a programming interface to corresponding epidemiological model.



Fig. 5. The user interface of the analytics tool in the GLEaMvis simulation environment

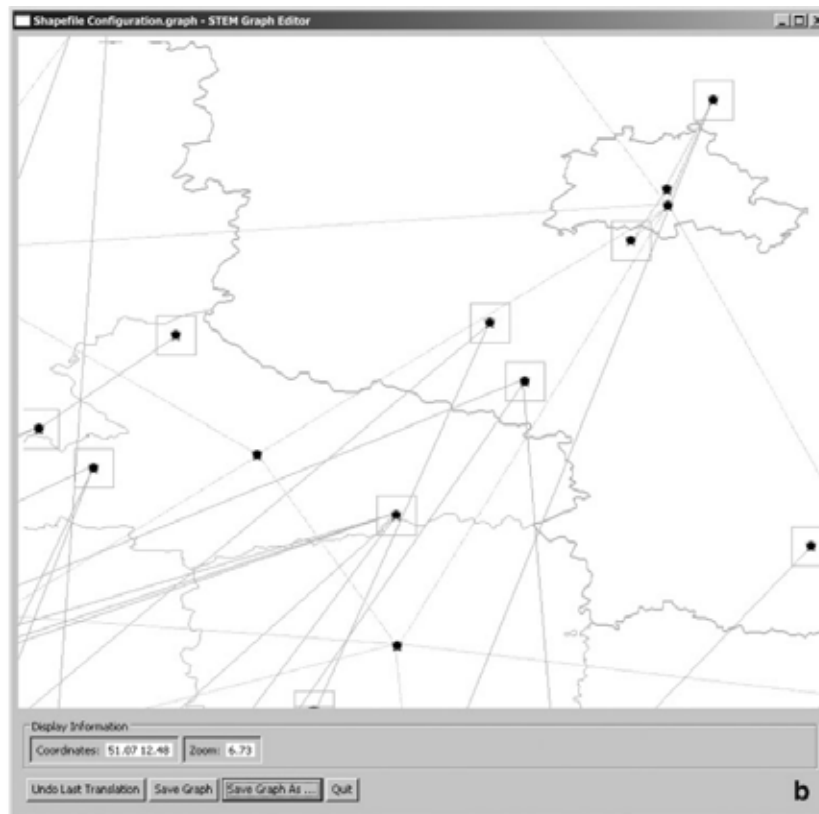


Fig. 6. The user interface of the graph editing tool in the STEM simulation environment

These design choices allowed us to develop an epidemiological modeling environment CTraceEnv which provides necessary tools for the development and analysis of such models.

The user interface of CTraceEnv consists of two main sections: model editor and model analysis (Fig. 7).

Model editor allows one to describe agent-based epidemiological model using CTrace language. It

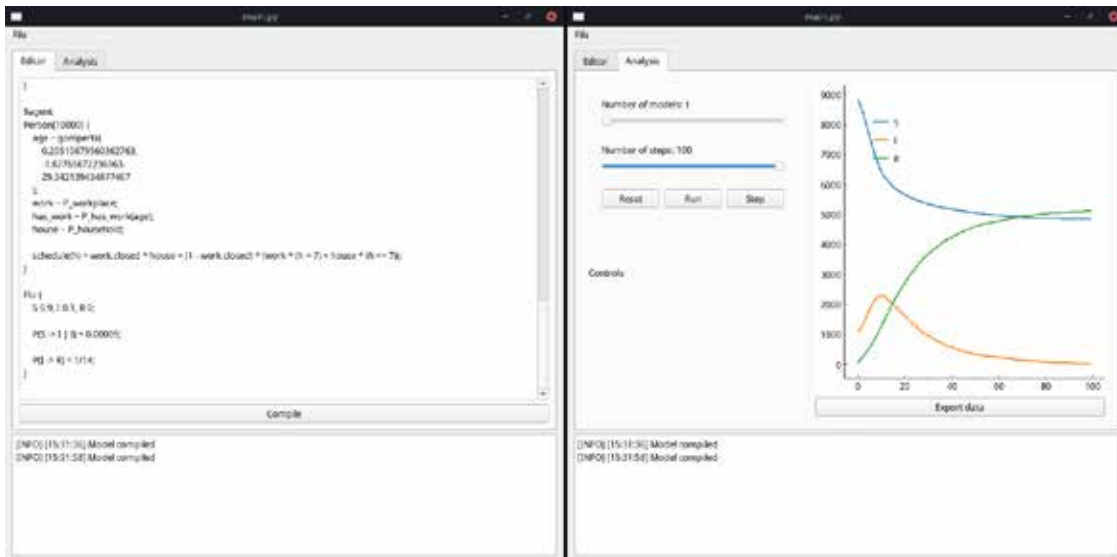


Fig. 7. CTraceEnv application interface. Left column - model editor section, right column - model analysis section

offers compilation functionality together with error logging interface.

Model analysis window itself consists of two columns: simulation controls and epidemiological dynamics graph. Simulation controls allow one to control number of model iterations as well as number of parallel models. If model contains global variables, controls for changing their values will be displayed in the corresponding section. Dynamics graph offers simple visualization of evolution of number of agents with each infection state. In the case, when multiple models are run in parallel, the graph displays average, 25th and 75th percentile of corresponding values. To support more complex analysis of developed models, CTraceEnv offers interface for data export in CSV format.

CTraceEnv environment is build using PyQt graphical user interface library for Python

programming language to ensure cross-platform capabilities.

Conclusions. The purpose of this paper was to introduce CTraceEnv, an epidemiological modeling environment that is built on top of the CTrace modeling language. Our aim was to create a user-friendly tool that enables researchers and epidemiologists to efficiently develop and analyze epidemiological models without the need for advanced programming or computer science skills.

By offering a simple and accessible tool, CTraceEnv provides a powerful platform for developing and analyzing complex epidemiological models. It is our hope that this tool will enable researchers to gain a better understanding of the dynamics of infectious diseases, which will ultimately lead to improved public health outcomes.

Bibliography:

1. Cyrus H Gordon. "The new Amarna tablets". In: *Orientalia* 16.1 (1947), pp. 1–21.
2. Suzanne Austin Alchon. *A pest in the land: new world epidemics in a global perspective*. UNM Press, 2003, p. 21.
3. James P Warbasse. "Anomalies and Curiosities of Medicine". In: *Annals of Surgery* 26.1 (1897), p. 150.
4. Coronaviridae Study Group of the International Committee on Taxonomy of Viruses et al. "The species Severe acute respiratory syndrome-related coronavirus: classifying 2019-nCoV and naming it SARS-CoV-2". In: *Nature microbiology* 5.4 (2020), p. 536. doi: 10.1038/s41564-020-0695-z.
5. Raj Dandekar and George Barbastathis. "Quantifying the effect of quarantine control in Covid-19 infectious spread using machine learning". In: *medRxiv* (2020).
6. Mai Anh BUIT et al. "The Kendrick modelling platform: language abstractions and tools for epidemiology". In: *BMC bioinformatics* 20.1 (2019), pp. 1–13.
7. Swarm. 2021. url: http://www.swarm.org/wiki/Main_Page.
8. Padmavathi Patlolla et al. "Agent-based simulation tools in computational epidemiology". In: *International Workshop on Innovative Internet Community Systems*. Springer. 2004, pp. 212–223.
9. Dennis L Chao et al. "FluTE, a publicly available stochastic influenza epidemic simulation model". In: *PLoS computational biology* 6.1 (2010).

10. Wouter Van den Broeck et al. “The GLEaMviz computational tool, a publicly available software to explore realistic epidemic spreading scenarios at the global scale”. In: BMC infectious diseases 11.1 (2011), pp. 1–14.
11. Alexander Falenski et al. “A generic open-source software framework supporting scenario simulations in bioterrorist crises”. In: Biosecurity and bioterrorism: biodefense strategy, practice, and science 11.S1 (2013), S134-S145.
12. John J Grefenstette et al. “FRED (A Framework for Reconstructing Epidemic Dynamics): an open-source software system for modeling infectious diseases and control strategies using census-based populations”. In: BMC public health 13.1 (2013), pp. 1–14.
13. Uri Wilensky. NetLogo 6.2.2 User Manual. 2022. url: <https://ccl.northwestern.edu/netlogo/docs/>.
14. KK Avilov and O Yu Solovey. “Institute of numerical mathematics of Russian Academy of Sciences Moscow Institute of Physics and Technology (State University)”.
15. Repast. 2021. url: <https://repast.github.io/>.
16. Nicholson Collier and Michael North. “Parallel agent-based simulation with repast for high performance computing”. In: Simulation 89.10 (2013), pp. 1215–1235. doi: 10.1177/0037549712462620.
17. Vladyslav Sarnatskyi and Igor Baklan. “CTrace: Language for Definition of Epidemiological Models with Contact-Tracing Transmission”. In: International Scientific Conference “Intellectual Systems of Decision Making and Problem of Computational Intelligence”. Springer. 2022, pp. 426–448.

Сарнацький В.В., Баклан І.В. STRACEENV: ПЛАТФОРМА РОЗРОБКИ ТА АНАЛІЗУ АГЕНТНИХ ЕПІДЕМІОЛОГІЧНИХ МОДЕЛЕЙ З ВИКОРИСТАННЯМ МОВИ STRACE

За останні кілька років епідеміологічне моделювання стає все більш значущим аспектом контролю та боротьби з інфекційними захворюваннями. Одним з найбільш перспективних підходів до моделювання динаміки інфекційних захворювань є агентні моделі (АМ), які пропонують детальний і гнучкий інструментарій для імітації передачі хвороби у середовищі населення. У цьому дослідженні ми описуємо наші зусилля по створенню середовища, яке спрощує розробку та аналіз АМ для цілей епідеміологічного моделювання.

Наш підхід базується на використанні мови моделювання CTrace, яка пропонує інтуїтивно зрозумілий синтаксис для визначення АМ. За допомогою зручних інструментів цієї мови користувачі можуть визначити окремих агентів у популяції, їх взаємодію і те, як хвороба поширюється серед них. Крім того, компілятор мови здатний генерувати програмні бібліотеки, які ми успішно використали в розробленому нами середовищі.

Щоб полегшити розробку АМ за допомогою CTrace, ми розробили середовище, яке полегшує інтеграцію мови із зовнішніми інструментами. Середовище включає інтуїтивно зрозумілий інтерфейс, який проводить користувачів через процес визначення моделі та запуску симуляцій. Крім того, однією з ключових особливостей середовища є його здатність виконувати базовий аналіз моделі, наприклад, відображати статистику епідемії в часі. Потім цю інформацію можна експортувати для подальшого аналізу за допомогою зовнішніх інструментів, таких як R або Python.

Наше дослідження підкреслює важливість створення зручних для користувача середовищ, які спрощують розробку та аналіз АМ для епідеміологічного моделювання. Використання мови моделювання CTrace та розробленого середовища пропонує потужний та ефективний інструмент для дослідників для моделювання передачі захворювань та дослідження ефективності різних стратегій контролю. Таким чином, наш підхід може виявитися корисним у розробці більш точних та ефективних моделей для управління інфекційними захворюваннями.

Ключові слова: епідеміологія, моделювання, агентне моделювання, програмне забезпечення, середовище моделювання.

Ткачук А.Г.

Державний університет «Житомирська політехніка»

КОНЦЕПЦІЯ ПІДБОРУ ДВИГУНІВ МОБІЛЬНОЇ РОБОТИЗОВАНОЇ ПЛАТФОРМИ ІЗ АВТОНОМНОЮ СИСТЕМОЮ СТАБІЛІЗАЦІЇ

Приведено опис нової роботизованої мобільної платформи із автономною системою стабілізації для проведення розвідувальних операцій. Встановлено, що найпоширеніші задачі військових мобільних роботів – це використання для розвідки, знешкодження бомб та ведення бойових дій. Оголошено, що двигуни мобільних роботів відрізняються в залежності від типу робота та його завдань. Одним з найпоширеніших типів двигунів, які використовуються в мобільних роботах, є електричні двигуни. Вони працюють на електричному заряді та мають низький рівень шуму та викидів. Це робить їх ідеальним вибором для роботів, які потребують тихого та екологічно чистого руху. В загальному, вибір двигуна для мобільного робота залежить від типу робота, його завдань, потреби в енергії, швидкості руху, місцевості, на якій робот буде використовуватися, та інших факторів. Визначено, що важливим аспектом вибору двигуна є забезпечення надійності та безпеки самого робота під час його руху. Тому вибір двигуна також залежить від можливості контролювання руху робота та його стійкості на різних поверхнях. Описано концепцію підбору двигунів мобільної роботизованої платформи із автономною системою стабілізації. Вибираючи двигуни постійного струму, необхідно розуміти деякі базові фізичні закони, які впливатимуть на мобільного робота. Наприклад: сила, вага, маса, крутний момент, прискорення і швидкість, а також взаємозв'язок між ними. Визначено, що двигун може видавати набагато більший крутний момент, ніж може витримати редуктор або підшипники. Іншим вагомим фактором впливу є граничний крутний момент редуктора. Він може бути меншим, ніж двигун може фактично забезпечити. Саме тому встановлено, що втрати потужності двигунів становлять 50% або більше і тоді треба обирати двигун, який забезпечить принаймні вдвічі більшу потужність, ніж потрібно.

Ключові слова: мобільний робот, роботизована платформа, двигун, потужність, точність, стабілізація.

Постановка проблеми. Військові мобільні роботи – це роботи, які призначені для використання військовими у різних операціях. Вони можуть бути використані для розвідки, знешкодження бомб, ведення бойових дій, пересування вантажів, і багато іншого. Військові мобільні роботи зазвичай оснащені різними типами сенсорів, камерами, мікрофонами та іншими датчиками, які дозволяють їм отримувати інформацію про навколишнє середовище та передавати її військовим. Вони можуть бути керовані дистанційно або автономно, в залежності від їх призначення та завдань, які вони повинні виконувати. Військові мобільні роботи можуть бути різних розмірів та форм, включаючи наземні, повітряні та водні роботи. Вони можуть бути використані для допомоги військовим у зниженні ризиків, збільшенні ефективності та забезпеченні переваг у бойових умовах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У статті [1, с. 217; 2, с. 1] описано стан і перспективи розвитку роботизованих дистанційно-керованих мобільних платформ, які можуть використовуватись як у військових, так і цивільних цілях.

У роботі [3, с. 1] приведено дослідження керування просторовим наведенням танкової гармати. Система керування танковою гарматою приводиться в рух і стабілізується сервосистемою двигуна. Однак складні нелінійності в ній, такі як тертя, викликають наявність значних похибок. У статті розроблено модель динаміки зчеплення двигуна і механізму, побудовано на основі принципу еквівалентного моменту. На цій основі побудовано обчислений регулятор моменту, невизначеність якого оцінювалася за допомогою нейронної мережі радіальної базисної функції.

У статті [4, с. 9; 5, с. 5] описано останні тенденції та просторовий розподіл дослідницьких активностей у галузі військової робототехніки. Досліджено різні технології військових мобільних роботів та їх застосування в різних сферах, включаючи розвідку, дезактивацію вибухових пристроїв та бойову діяльність.

У роботі [6, с. 1] описано новий мобільний робот, який здатний масштабувати горизонтальні та вертикальні поверхні, використовує мікроприсоски для забезпечення адгезії для проходження

по різних поверхнях. Запропонована модель здатна знімати зображення, відео та аудіо в режимі реального часу, щоб забезпечити спостереження за людиною або територією. Робот підходить для військових застосувань з метою спостереження та розвідки.

Постановка завдання. Двигуни мобільних роботів відрізняються в залежності від типу робота та його завдань. Одним з найпоширеніших типів двигунів, які використовуються в мобільних роботах, є електричні двигуни. Вони працюють на електричному заряді та мають низький рівень шуму та викидів. Це робить їх ідеальним вибором для роботів, які потребують тихого та екологічно чистого руху.

Іншим поширеним типом двигунів є двигуни внутрішнього згорання або турбінні двигуни. Вони зазвичай використовуються в повітряних роботах, таких як дрони або БПЛА, тому що вони забезпечують потрібний рівень тяги.

Також для руху мобільних роботів можуть використовуватися, наприклад, пневматичні або гідравлічні системи. У таких роботах гідравлічні або пневматичні насоси створюють тиск, який потім перетворюється на рух робота. Ці системи, зазвичай, використовуються при великих навантаженнях, таких як підйом великих вантажів або рух габаритних машин.

В загальному, вибір двигуна для мобільного робота залежить від типу робота, його завдань, потреби в енергії, швидкості руху, місцевості, на якій робот буде використовуватися, та інших факторів. Наприклад, якщо мобільний робот має проводити довгий час на роботі без зарядки, то можуть використовуватися більш ефективні та міцніші джерела живлення, такі як літій-іонні або літій-полімерні батареї. Якщо робот має рухатися в умовах, де присутня велика кількість перешкод, то важливим фактором може стати маневреність та поворотність робота.

Крім того, важливим аспектом є забезпечення надійності та безпеки робота під час його руху. Тому вибір двигуна також залежить від можливості контролювання руху робота та його стійкості на різних поверхнях.

Зважаючи на вищевказані фактори, вибір двигуна для мобільних роботів є складним завданням, яке потребує уважного аналізу технічних та функціональних вимог до робота. Проте, правильний вибір дозволяє досягти ефективної та безпечної роботи мобільного робота в будь-яких умовах.

Мета – розробити концепцію підбору двигунів для мобільної роботизованої платформи із авто-

номною системою стабілізації, призначеної для проведення розвідувальних операцій.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Науковцями кафедри робототехніки, електроенергетики та автоматизації ім. проф. Б.Б. Самотокіна Державного університету «Житомирська політехніка» під керівництвом автора статті розроблено нову мобільну роботизовану платформу для проведення розвідувальних операцій із автономною системою стабілізацією оптичних приладів (рис. 1) [7, с. 67].

Мобільна роботизована платформа побудована на базі малошумного гусеничного шасі. Гусениці платформи зроблені з інженерного пластика, який забезпечує відмінну еластичність, чудовий демпфуючий ефект і високе зчеплення шасі з дорогою. Максимальна швидкість обертання: 160 об/хв. Максимальна вантажопідйомність платформи – 6 кг.



Рис. 1. Мобільна роботизована платформа для проведення розвідувальних операцій

На шасі розміщені аналогова камера нічного бачення та тепловізор. Обидва оптичні сенсори закріплені на спеціалізованій рухомій башті з власною системою стабілізації.

Мобільна роботизована платформа має два потужні електродвигуни постійного струму, оснащені редукторами з металевими шестернями) [8, с. 73; 9, с. 142; 10, с. 161].

Двигун постійного струму (DC) складається з набору магнітів, котушки ротора та комутатора. Коли подається струм на котушку ротора, вона перетворюється на електромагніт і відштовхує інші магніти. Комутатор змушує струм в котушці ротора змінювати полярність під час його обертання. Ця зміна полярності стимулює котушку ротора відштовхувати магніти і створювати постійний крутний момент. Швидкість обертання двигуна постійного струму пропорційна напрузі, що подається на ротор. Потужність, що виробляється двигуном, пропорційна напрузі, помноженій на струм:

$$P = U \cdot I, \quad (1)$$

де P – потужність; U – напруга; I – струм.

Інший ключовий зв'язок наведено нижче:

$$P = T \cdot \omega, \quad (2)$$

де P – потужність; T – крутний момент; ω – кутова швидкість [11, с. 36].

Це означає, що для того, щоб збільшити вихідну потужність двигуна, можна збільшити номінальну напругу або збільшити струм. Наприклад, двигун постійного струму на 12 В (як у спроектованій платформі) може видавати таку ж потужність, як і двигун постійного струму на 6 В, але при вдвічі меншому струмі. Це важливо, тому що більшість компонентів обмежені силою струму, яку вони можуть витримати. Якщо мобільна роботизована платформа буде дуже важка (або навантажена корисним вантажем), то доцільно розглядати двигуни постійного струму на 24 В або навіть 90 В.

Ще однією ключовою властивістю двигунів постійного струму є те, що швидкість регулюється за допомогою зміни напруги. При визначенні розміру двигуна постійного струму будемо використовувати номінальну напругу двигуна, тобто максимальну напругу, на яку розрахований двигун. Існує кілька різних типів двигунів постійного струму. У більшості випадків використовують щіткові двигуни постійного струму.

Зменшення швидкості призводить до збільшення крутного моменту. Це оптимально для старту, оскільки більшість двигунів постійного струму мають частоту обертання вихідного валу

(обертів на хвилину) в кілька тисяч і дуже малий крутний момент. Використання редуктора зменшить швидкість обертання валу і збільшить крутний момент.

Вибираючи двигуни постійного струму, необхідно розуміти деякі базові фізичні закони, які впливатимуть на мобільного робота. Наприклад: сила, вага, маса, крутний момент, прискорення і швидкість, а також взаємозв'язок між ними.

Вага визначається як сила, що виникає внаслідок дії прискорення сили тяжіння на тіло. На поверхні Землі використовують значення прискорення сили тяжіння рівне $9,8 \text{ м/с}^2$.

На рис. 2 зображено різні сили, які будуть діяти на мобільного робота.

Вплив гравітації на роботизовану платформу:

$$F = m \cdot a \quad (3)$$

На рис. 2 ключовими силами є:

$$W = m \cdot a = m \cdot g = mg, \quad (4)$$

де W вага; m маса; a прискорення; g прискорення сили тяжіння.

На рис. 2 сила ваги розбивається на дві складові:

$$F_{pd} = f_g, \quad (5)$$

де F_{pd} сила, що тягне робота вниз по нахилу; $F_{pd} = f_g =$ сила тяжіння; g прискорення сили тяжіння; m маса; $\sin\theta$ кут нахилу.

Ця сила тягне робота назад і вниз по нахилу і повинна бути подолана обраним двигуном. Чим більший кут нахилу, тим більшою буде ця сила. Нахил, на який намагається піднятися робот, сут-

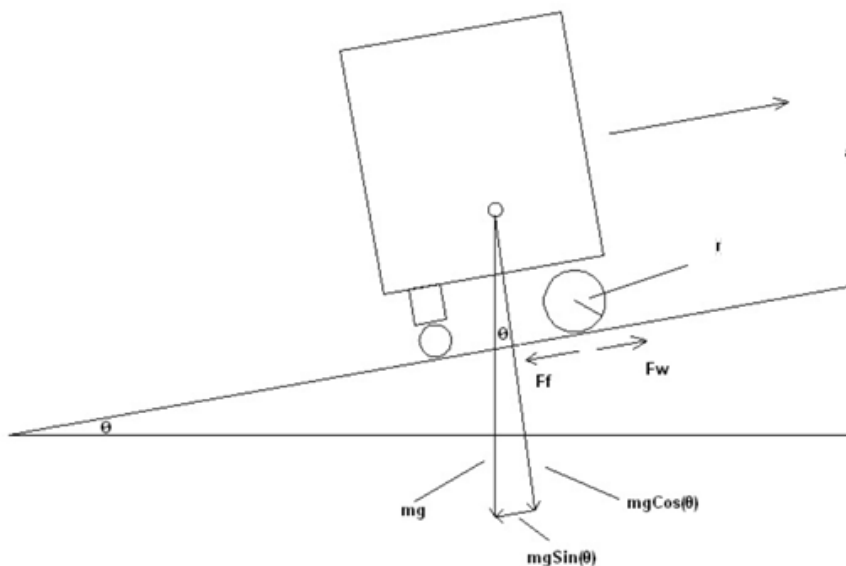


Рис. 2. Схема робота з двома передніми ведучими колесами та заднім поворотним механізмом [11, с. 34]

тво впливає на крутний момент, необхідний від приводних двигунів.

$$F_p = f_n =, \quad (6)$$

де F_p сила, що утримує робота на схилі; f_n – сила тертя.

Ця сила утримує роботизовану платформу на схилі. Разом з силою тертя необхідні для того, щоб привідні колеса платформи могли штовхати її вперед по схилу. На рис. 2 крутний момент – це сила на краю ведучих коліс, яка штовхає роботизовану платформу вгору по схилу. Крутний момент – це вимір сили, прикладеної для обертання тіла навколо певної осі. У мобільному роботі тілом буде колесо, а віссю – вал двигуна.

$$T = F \cdot d, \quad (7)$$

де T – крутний момент; F – сила; d – відстань.

Швидкість, з якою робот буде рухатися вгору по схилу:

$$V = \frac{a \cdot t}{2} + V_i, \quad (8)$$

де V – швидкість; a – прискорення; t час; V_i початкова швидкість.

Тепер, коли проаналізовано всі сили, що діють на роботизовану платформу, розпочнемо процес визначення розмірів приводних двигунів.

Щоб визначити, якого розміру двигуни нам потрібні для платформи, необхідно визначити наступне:

З рис. 2 зосередимося на силах, що діють паралельно до похилої поверхні. Також припустимо, що робот стартує з місця і повинен розігнатися до повної швидкості:

$$T = f_w \cdot r, \quad (9)$$

де T – крутний момент; f_w сила, що тисне на колесо; r радіус ведучого колеса.

У фізиці всі сили повинні врівноважуватися, що дає рівняння:

$$\sum F = 0$$

Якщо робот рухається з постійною швидкістю, сума всіх сил дорівнюватиме нулю:

$$\sum F = f_t = f_w - f_g = 0, \quad (10)$$

де f_t сумарна сила; f_w сила, що тисне на колесо; f_g сила, що тягне робота вниз по нахилу під дією сили тяжіння.

Щоб правильно визначити розмір двигуна, необхідно розгін робота зі стану спокою до повної швидкості. Крутний момент, необхідний для того, щоб змусити робота рухатися, може бути набагато більшим, ніж для утримання його в процесі руху. У цьому випадку сума сил, що діють на робота, дорівнюватиме загальній масі, помноженій на прискорення.

$$\sum F = f_t = f_w - f_g = Ma$$

в кінцевому результаті отримаємо:

$$T = M(a + g \sin \theta) r \quad (11)$$

Це загальний крутний момент (11), необхідний для керування роботом. Оскільки зазвичай використовується два приводних двигуни, то значення моменту можемо розділити навпіл.

Нарешті, щоб визначити, яку потужність повинні подавати двигуни, слід використовувати наступне рівняння:

$$P = T \cdot \omega, \quad (12)$$

де P – потужність; T – крутний момент; ω кутова швидкість.

Отримані значення відповідають ідеальному режиму роботи. Більшість роботів не працюють у даному режимі, тому потрібно врахувати втрати в двигуні постійного струму і неефективність редуктора. Зазвичай припускають, що втрати становлять 50% або більше і тоді треба обирати двигун, який забезпечить принаймні вдвічі більшу потужність, ніж потрібно.

Під час описаного методу вибору двигуна припущено, що тертя між колесом і поверхнею достатньо, щоб не було ковзання. Насправді, більшість коліс обертаються, коли робот запускається на повній швидкості на слизькій поверхні. У деяких випадках це може стати справжньою проблемою. Одне з рішень у цій ситуації – вибрати інші колеса. Або ще краще – збільшити швидкість двигуна замість того, щоб запускати його на повній швидкості.

Двигун може видавати набагато більший крутний момент, ніж може витримати редуктор або підшипники. На деяких двигунах можливо побачити номінальне навантаження. Це максимальна вага, яку виробник рекомендує підтримувати на вихідному валу. Іншим фактором є граничний крутний момент редуктора. Він може бути меншим, ніж двигун може фактично забезпечити. Один із способів визначити якість двигуна – це оцінити шум, який він видає під час роботи. Чим гучніший двигун, тим менш ефективним є мотор-редуктор.

Отже, загалом при виборі двигунів мобільних роботизованих платформ у більшості випадків слід прагнути до перевищення розрахункових вимог у два-три рази.

Висновки. Розглянуто нову роботизовану мобільну платформу із автономною системою стабілізації для проведення розвідувальних операцій. Встановлено, що одним з найпоширеніших типів двигунів, які використовуються в мобільних наземних роботах, є електричні двигуни. Вибір двигуна для мобільного робота залежить від типу робота, його завдань, потреби в енергії, швидкості руху, місцевості, на якій робот буде використовуватися, та інших факторів. Описано концепцію підбору двигунів мобільної роботизованої платформи із автономною системою стабілізації. Встановлено, що при виборі двигунів мобільних роботизованих платформ у більшості випадків слід прагнути до перевищення розрахункових вимог по потужності у два-три рази.

Список літератури:

1. Son Kuswadi, Mohamad Nasyir Tamara, Dwi Nugroho H. W. Development of Gun Turret Drive Stabilization System with a Microcontroller and Implementation on a Model Tank. *International Journal of Engineering Research and Applications*. 2014. Vol. 555. pp. 217-221.
2. Nasyir Moh T., Nurhadi H., Pramujati B., Pitowarno E. Control Simulation of An Automatic Turret Gun Based on Force Control Method. *Proceeding of INAGENTSYS*, August 19-21, 2014, Bandung, Indonesia.
3. Huaqing Zheng, Xiaoting Rui, Jianshu Zhang, Junjie Gu, Shujun Zhang. Nonlinear motor-mechanism coupling tank gun control system based on adaptive radial basis function neural network optimized computed torque control. *ISA Transactions*. 2022. Vol. 131(5). DOI: 10.1109/ICIECS.2015.7193127
4. Peter Simon Sapaty. Military Robotics: Latest Trends and Spatial Grasp Solutions. (*IJARAI*) *International Journal of Advanced Research in Artificial Intelligence*, Vol. 4, No.4, 2015. pp. 9-18.
5. P. Sapaty. The World as an Integral Distributed Brain under Spatial Grasp Paradigm. *Book chapter in Intelligent Systems for Science and Information*, Springer, Feb 4, 2014.
6. R. Karthikeyan; S. Karthik; Prasanna Vishal TR; S. Vignesh. Snitch: Design and development of a mobile robot for surveillance and reconnaissance. *2015 International Conference on Innovations in Information, Embedded and Communication Systems (ICIECS)*. 2015. DOI:10.1016/j.isatra.2022.05.011
7. Ткачук А.Г., Безвесільна О.М. Новий прецизійний чутливий елемент автоматизованої системи стабілізації озброєння: монографія з грифом Державного університету «Житомирська політехніка». 2022. 272 с.
8. А.Г. Ткачук, О.М. Безвесільна, А.А. Гуменюк, В.М. Янчук, І.В. Крижанівська. Дослідження основних напрямків розвитку сучасних системи стабілізації озброєння. *Науковий журнал «Технічна інженерія»*. 2020. Вип. 2(86). С. 73-80.
9. Ткачук А. Г., Безвесільна О. М., Бондарчук В. М., Крижанівська І. В. Проектування стабілізованої платформи інформаційно-виміральної системи для проведення розвідувальних операцій. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: «Технічні науки»*, №2, 2022. С. 141-145.
10. Ткачук А.Г. Градувальна характеристика чутливого елемента системи стабілізації оптичних пристроїв на базі роботизованої платформи. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2022. Том 33 (72). № 5. С. 159-163.
11. Neal A.J. Tips for selecting DC motors for your mobile robot. *SERVO*. 2010. Vol. 1. pp. 33-37.

Tkachuk A.H. THE ENGINE SELECTION CONCEPT OF A MOBILE ROBOTIC PLATFORM WITH AN AUTONOMOUS STABILIZATION SYSTEM

A description of a new robotic mobile platform with an autonomous stabilization system for reconnaissance operations is provided. The most common tasks of military mobile robots have been found to be used for reconnaissance, bomb disposal, and combat operations. It has been announced that the engines of mobile robots differ depending on the type of robot and its tasks. One of the most common types of motors used in mobile work are electric motors. They work on an electric charge and have a low level of noise and emissions. This makes them an ideal choice for robots that require quiet and environmentally friendly movement. In general, the choice of engine for a mobile robot depends on the type of robot, its tasks, energy requirements, speed of movement, the terrain on which the robot will be used, and other factors. It was determined that an important aspect of choosing an engine is ensuring the reliability and safety of the robot itself during its movement. Therefore, the choice of the engine also depends on the ability to control the movement of the robot and its stability on different surfaces. The concept of selecting engines for a mobile robotic platform with an autonomous stabilization system is described. When choosing DC motors, it is necessary to understand some basic physical laws that will affect the mobile robot. For example: force, weight, mass, torque, acceleration and speed, as well as the relationship between them. It has been determined that the motor can produce much more torque than the gearbox or bearings can handle. Another significant influencing factor is the limiting torque of the gearbox. It may be less than the engine can actually provide. That is why it is established that the power losses of the engines are 50% or more and then it is necessary to choose an engine that will provide at least twice as much power as required.

Key words: mobile robot, robotic platform, engine, power, precision, stabilization.

Ushakova I.O.

Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics

Hrabovskyi Ye.M.

Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics

Bondarenko D.O.

Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics

MODELING AND SELECTION OF A DISTANCE LEARNING SYSTEM FOR A HIGHER EDUCATION INSTITUTION BASED ON THE METHOD OF HIERARCHY ANALYSIS USING THE DSS

Today, one of the key global trends in the educational process is the expansion of the use of distance learning systems (DLS). The most popular DLS are gaining popularity among higher education students. Successful DLS is based on the correct choice of software that meets the specific requirements, goals and objectives of the higher education institution. The goal of the study is to substantiate the choice of a DSS that meets the needs of higher education institutions based on models and methods of hierarchy analysis and using a decision support system (DSS). The object of research is the processes of modeling and selecting a DSS among those available on the market. The subject of research is the models and methods of hierarchy analysis for selecting a distance learning system using a decision support system. The study of DLS was conducted on the basis of the factors that determine the peculiarities of their use in the educational process of higher education institutions (HEIs). To determine the criteria for selecting a DLS, the methods of grouping the most significant factors were used. The following main criteria were identified: technical aspects, adaptation, administration, course management, user data management, communication tools, learning objects, usability. The most popular Open Source systems on the market were selected for the analysis of LMS: Moodle, ATutor, Sakai, OpenUSS. The hierarchy analysis method was used to conduct an experiment to rank the LMS depending on their priority. The construction and experimental testing of the hierarchy analysis model was carried out using the DSS "Choice". In the course of the experiment, a hierarchy model was created for ranking the DLS, the values of their importance were determined for the previously selected criteria, a pairwise comparison of the hierarchy elements by their importance was carried out, and pairwise comparisons of alternatives were made for all criteria. The originality of the study is to determine the main criteria for selecting DLS and to create a model based on the method of hierarchy analysis for ranking DLS by priority. The practical value lies in the development of a methodology to justify the choice of DLS, as well as in determining the most suitable DLS among popular Open Source systems.

Key words: *distance learning system, Open Source system, selection criteria, hierarchy analysis method, decision support system.*

Formulation of the problem. The events of recent years related to the pandemic and subsequent military actions in Ukraine have shifted the focus of the educational process to the use of distance learning platforms. One of the key global trends in the educational process is the expansion of the use of e-learning and distance learning technologies in all forms of education in all areas of study, the creation of e-learning courses and other types of electronic content for educational purposes, and standardization in the development of electronic content. Distance learning systems are gaining the most popularity among students of higher education

and for professional development, which is related to the peculiarities of the organization of processes in these areas.

Flexibility and convenience are two of the most important deciding factors for students when choosing between online learning and traditional classroom learning. In the Online College Students 2022 survey conducted by Learning House, 87% of online bachelor's and master's students agreed or strongly agreed that online learning is worth the cost [8]. This is a 16% percentage point increase over the opinions of students five years ago, demonstrating the growing acceptance and interest in online programs

in higher education. Modern students see the value of online learning as it allows students with special needs and working students of all ages to earn a degree while balancing their work, family, and study priorities. Forward-thinking colleges and universities are developing flexible online programs for their disciplines that are in demand.

Based on the relevant trends in distance learning, it can be assumed that as the relevance of distance learning will continue after the pandemic and the war effort, and the interest and number of applicants with certain needs is constantly growing, higher education institutions will also expand their online program offerings as a strategic response to growing demand [1]. The current state of computing facilities and the widespread use of the Internet provide an opportunity to realize numerous advantages of e-learning technologies, such as: remoteness, mass participation, high level of interactivity, access to electronic libraries, formation of a single educational environment, etc.

Distance learning systems (DLS) are the basis of the modern educational process and are used to organize and conduct both classroom and distance learning, develop, manage and distribute learning materials with shared access. It is difficult to overestimate the importance of these platforms in the context of limited access of students to educational institutions and the organization of distance learning. Today, there are a large number of both paid and free learning management platforms.

The successful implementation of e-learning is based on the right choice of software that meets the specific requirements, goals and objectives set by the higher education institution. This choice is related to the need to take into account a certain number of criteria and the development of the software segment and the emergence of new e-learning systems. The need to take into account a large number of interrelated factors and a changing environment require the use of a systematic approach, mathematical methods and information technologies in decision-making to justify the choice of a distance learning system. In this regard, decision support systems (DSS) are widely used in the tasks of choosing alternatives in decision-making.

Choosing a distance learning platform is a very important issue for every institution that decides to implement distance learning. To implement informed decision-making, it is necessary to accurately define the area of knowledge in which information is often poorly structured and requires formalization and the formation of an ontological model of the subject area.

Analysis of recent research and publications. A lot of research is devoted to the problems related to the use and selection of a distance learning system that meets the basic requirements of educational institutions. Among the scientific publications are the following issues: the attitude of students and teachers to distance learning platforms [4, 13, 14], justification of the criteria for choosing a distance learning system and the choice of modeling methods and tools to justify the choice of a particular system [3, 15].

In the study [3] the research was aimed at ranking distance learning platforms based on the criteria of human-computer interaction to justify the decision to choose the best platform. The authors grouped the selection criteria into ease of use, mental load, interface design, presentation methods, and interactivity. Fuzzy logic was used as a method for ranking platforms. The results show that the most important criterion was the mental load when using the platform.

The authors of the study [4] analyzed the attitude of higher education students to receiving education through distance learning systems. A special questionnaire was created to obtain the data. The survey results showed a positive attitude towards the role of distance learning in education. The research provides recommendations for improving the use of learning platforms in distance higher education: the strengths, such as student exchange and self-study, and the weaknesses, such as delayed feedback and content storage.

Another study [12] was aimed at analyzing the perception of higher education teachers of the use of distance learning systems during the transition from the traditional educational model to distance learning. The study conducted a statistical analysis of teachers' attitudes toward changing educational scenarios from traditional to distance learning, as well as the main problems of the transition period. The data collection was developed through the Google Forms application and distributed among teachers of public and private higher education institutions. The survey results showed that more than 60% of respondents had experience using Moodle, Google Classroom, and Blackboard; 80% of teachers had been trained at their institution in the use of virtual platforms; and in 60% of cases, higher education institutions allowed them to choose a distance learning system.

In the study [6] the research is directed at determining the assessment of e-learning models and trends. It is about the criteria that can be used in further research on e-learning and gives an idea of its current state. The authors used the System Literature

Review (SLR) approach. Three main databases were used in the study: Science Direct, ACM, SCOPUS. The results of the research showed that there are 7 criteria for which the research was conducted, namely platform, evaluation model, assessment, model, approach, problem, trend and challenge. These criteria can be used for further research on e-learning. Thus, this study provides knowledge about the criteria that can be used in further research on e-learning and gives an insight into its current state.

In order to improve [7] the use of e-learning systems, it is proposed to identify the factors that have the greatest impact on their quality. The study focused on identifying and prioritizing factors related to the quality of e-learning system design through a hierarchical quality model. A literature review was conducted to identify the factors that most influence the quality of e-learning systems and the factors that have the most significant effect were identified. The authors ranked the criteria according to their relative importance based on a pairwise comparison. The remaining factors were then classified into four main categories. Content was identified as the most important factor, and design was identified as the least important factor.

In summary, the analysis of recent publications shows considerable interest in issues related to distance learning and distance learning systems. However, this problem requires further research, first of all, to justify the choice of a distance learning system based on a set of different criteria.

Purpose and task statement. So, the issue of choosing a distance learning system is relevant and determines the object, subject and purpose of the study.

The object of the study is the processes of modeling and selecting a distance learning system among those available on the market.

The subject of the study is models and methods of hierarchy analysis for selecting a distance learning system using the DSS.

The purpose is to substantiate the choice of a distance learning system that meets the needs of higher education institutions based on models and methods of hierarchy analysis and using the DSS.

The methods proposed in this publication are brought to practical implementation using an appropriate decision support system. They make it possible to model the decision-making process in hierarchical problems of criterion selection, as well as to select the best e-learning system based on the system of expert assessments using the hierarchy analysis method and use it to implement e-learning in higher education institutions. Successful implementation of

e-learning is based on the right choice of software that meets the specific requirements, goals and objectives of the organization.

Presentation of the main research material.

To choose a decision-making method for selecting a distance learning system, the advantages and disadvantages of the most popular methods were considered [9, 10, 11]. Table 1 shows the comparative characteristics of the methods by the following features: visualization of results, expert evaluation, use of qualitative and quantitative factors, prioritization of criteria, assessment of the stability of the decision, whether some risk is allowed.

Based only on the pros and cons of each method, it is difficult to choose which method is best for solving a given problem. Therefore, to choose a specific method, an additional analysis of methods is required with the identification of the main comparative features that are needed to model the decision-making process.

Based on the analysis, the decision tree and hierarchy analysis methods turned out to be the most flexible according to the criteria considered. However, the hierarchy analysis method allows processing both quantitative and qualitative information, which is why this method was used to select a distance learning system.

Among the distance learning systems, the most popular Open Source systems were considered [2]. This is a decisive factor in choosing a distance learning system for the vast majority of higher education institutions, as it allows them to customize the platform to the needs of a particular educational institution. Four alternatives were selected among the distance learning systems: Moodle, ATutor, Sakai, OpenUSS.

To select a distance learning system, it was necessary to formulate selection criteria [3, 6, 7]. To reduce the dimensionality of the future model, it was necessary to group many factors characterizing different aspects of these systems. As a result, the following criteria (groups) were chosen to evaluate and select a distance learning system:

- Technical aspects (system requirements, security, scalability).
- Adaptation (adaptability, personalization, extensibility).
- Administration (user management, authorization management).
- Course management (course management, test scoring, organization of course objects).
- User data management (tracking, statistics, online user identification, personal user profiles).

Table 1

Comparative characteristics of the main decision-making methods

Method	Visualization of results	Expert evaluation	Qualitative and quantitative factors	Prioritization of criteria	Sustainability of the decision	Allowance for risk
Linear programming	-	-	-	-	-	-
Non-linear programming	-	-	-	-	-	-
Decision tree	+	+	-	+	+	+
Hierarchy analysis method	+	+	+	+	+	+
Mini maxi solution	-	+	-	-	-	-

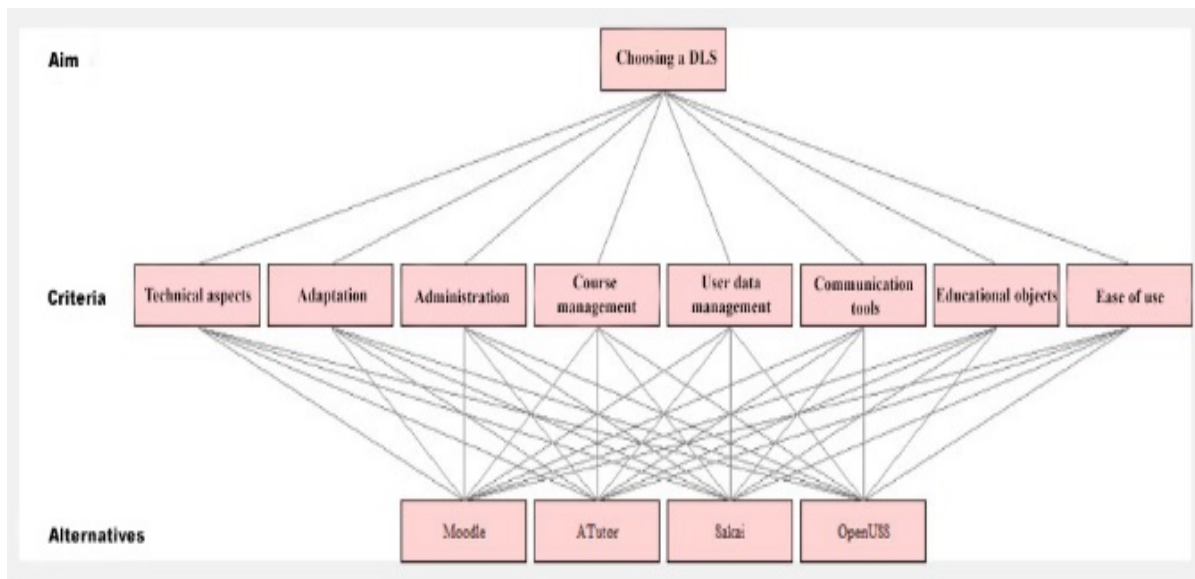


Fig. 1. Hierarchy model for evaluating the choice of DLS

- Communication tools (forums, chats, internal messages and mail, conferencing, synchronous and asynchronous tools).
- Learning objects (tests, training materials, training exercises, imported learning objects).
- Ease of use (user support, documentation, user-friendly design).

The implementation of the choice of educational programs by the method of hierarchy analysis was carried out using the DSS "Choice" [5]. This DSS allows structuring a task, setting a set of alternatives for its solution, identifying factors that characterize the alternatives, establishing the weight of these factors, evaluating alternatives by all the given factors, identifying contradictions in the expert's judgment, ranking alternatives and analyzing the resulting decisions. This system is based on the mathematically based method of hierarchy analysis by Thomas Saaty. The system is used to solve poorly structured and unstructured problems. The methodology for solving such problems is

based on a systematic approach, in which the problem is viewed as the result of the interaction of the interdependence of many different objects, and not just as their isolated and autonomous set.

The model development for selecting a distance learning system using the hierarchy analysis method includes the following steps:

1. Creating a hierarchy model;
2. Pairwise comparison of hierarchy elements by their importance;
3. Pairwise comparison of alternatives by all criteria.

The first stage of solving the problem is its presentation in the form of a hierarchy model that contains the goal – the choice of DLS, criteria for evaluating alternatives and the alternatives to solve the problem, from which the choice is made. The resulting hierarchy model is shown in fig. 1.

The next step is to compare the elements of the hierarchy in pairs. The comparison is based on the

Table 2

Ranking scale for criteria and alternatives		
Importance	Definition	Explanation
1	Equal importance	Both factors have the same impact on the goal
3	A bit more important	Assessment and personal experience show a slight preference for one over the other
5	More important	Evaluations and personal experience show a strong preference for one over the other
7	Much more important	Evaluation and personal experience show a significant advantage of one over the other. Its importance is demonstrated in practice
9	Absolutely more important	One is clearly superior to the other
2,4,6,8	Average values of importance	A compromise is needed

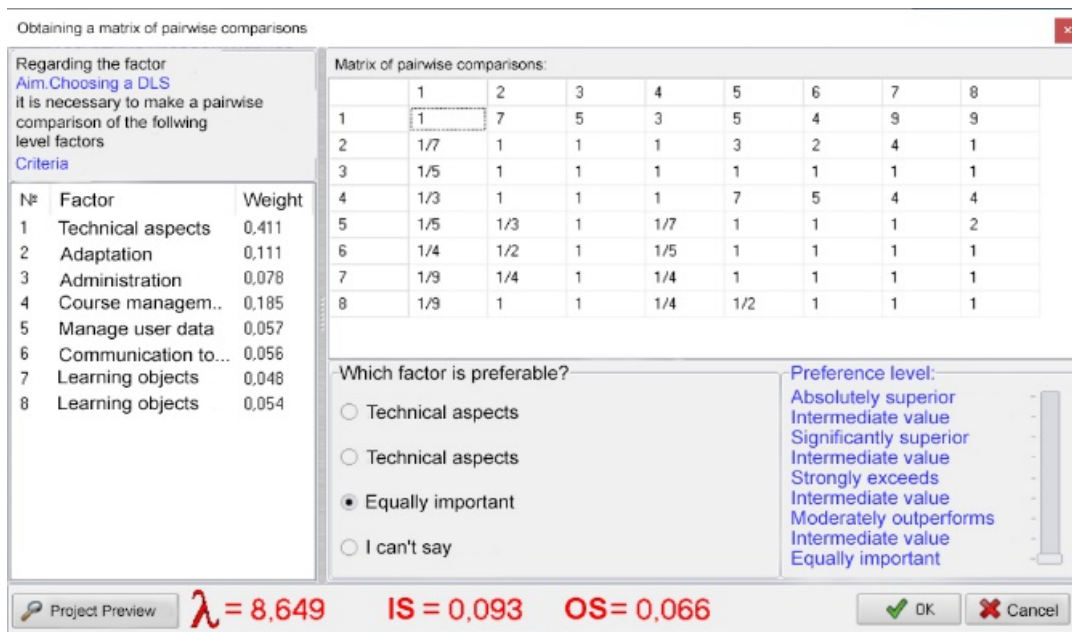


Fig. 2. Matrix for comparing criteria

decision maker's reasoning about the superiority of some elements over others. In this case, when making pairwise comparisons, the following questions are mainly asked when comparing two elements: which one is more important or has more influence, which one is better, which one is most likely.

A decision maker's (DM) judgment is based on his or her preference system, which consists of many different factors, such as understanding of the problem, constraints, legal, economic, social, and psychological factors. A ranking scale for criteria and alternatives with an intensity from 1 to 9 is used to formally present the results of the comparison (Table 2) [13].

Based on the results of the criteria comparison, a matrix is created. The matrix of comparison of criteria is filled with quantitative values of the intensity of the manifestation of one element of the hierarchy relative to another element, which were evaluated on a scale. For the previously selected criteria, the values of their importance were determined (table 3).

Table 3

Importance of the criteria for the DLS

Nº	Criterion	Importance
1	Technical aspects	1
2	Adaptation	7
3	Administration	5
4	Course management	3
5	User data management	5
6	Communication tools	4
7	Learning objects	9
8	Ease of use	9

Then, these values are entered into the DSS "Choice", which forms a matrix of pairwise comparisons (fig. 2).

At this stage, the consistency of experts' judgments is also monitored. Inconsistency of judgments may arise as a result of expert errors, incorrectly asked questions, or insufficient information, and when inconsistency occurs, it is not possible to determine the exact issues that caused it.

Consistency Index (CI) is a quantitative assessment of the contradictory nature of the results of comparisons. The consistency index is a positive value. The fewer contradictions in the comparison, the lower the value of the consistency index. When using the benchmarking method, the consistency index will be zero. The CI is determined by the following formula:

$$CI = (\lambda_{max} - n) / ((n - 1)^2) \tag{1}$$

where λ_{max} – is the maximum eigenvalue,
 n – is the dimension of the matrix

The calculation of the maximum eigenvalue λ_{max} is carried out using the pairwise comparison matrix as follows: each column of judgments is summed, then the sum of the first column is multiplied by the value of the first component of the normalized priority vector, the sum of the second column is multiplied by the second component, and so on, then the resulting numbers are summed.

The consistency ratio is calculated as the ratio of the calculated CI consistency index to the tabulated value of the TT. For an 8x8 matrix, this value is 1.40.

$$CR = CI / TT * 100\% \tag{2}$$

In our case, the CR is 6.6%. If the CR is more than 10%, it is necessary to revise the judgment [13].

At the next stage, matrices of pairwise comparisons of alternatives were compiled for all criteria. Comparison of DLS by the criteria "Technical aspects", "Adaptation", "Administration", "Course management", "User data management", "Communication tools", "Learning objects", "Ease of use" are shown in fig. 3-10.



Fig. 3. Matrix for comparing solutions by the "Technical aspects" criterion

Based on the results of the evaluation of alternatives for each of the criteria, the overall result is determined, which is expressed in the quantitative assessment of the priority of choosing each of the distance learning systems, which are presented in table 3.



Fig. 4. Matrix for comparing solutions by the "Adaptation" criterion



Fig. 5. Matrix for comparing solutions by the "Administration" criterion



Fig. 6. Matrix for comparing solutions by the criterion "Course management"



Fig. 7. Matrix for comparing solutions by the "User data management" criterion



Fig. 8. Matrix for comparing solutions by the "Communication tools" criterion



Fig. 9. Matrix of solutions comparison by the criterion "Educational objects"



Fig. 10. Matrix of solutions comparison by the "Ease of use" criterion

Table 3

Results of choosing a distance learning platform

Platform	Percentage of preference	Priority
Moodle	48,7%	1
ATutor	20,8%	2
OpenUSS	18,5%	3
Sakai	12,0%	4

The visual results of the priority assessment of the analyzed DLSs in the form of pie and bar charts are shown in fig. 11-12.

According to the survey, Moodle was found to be the best distance learning system. The percentage of preference for the Moodle alternative among all

others is 48.7%. The second place is taken by the ATutor system with a percentage of 20.8%, the third and fourth places are taken by the OpenUSS and Sakai systems with a percentage of 18.5% and 12.0% respectively.

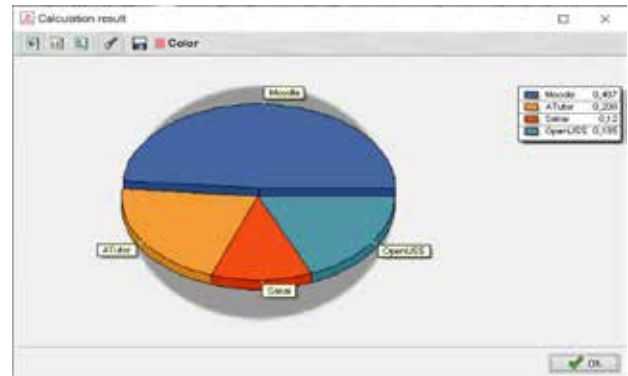


Fig. 11. Pie chart of the results of the assessment of DLS obtained in the DSS "Vybir"

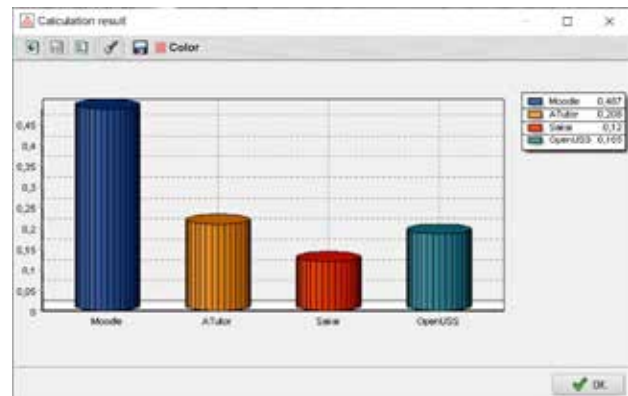


Fig. 12. Bar chart of the results of the assessment of the DLS obtained in the DSS "Vybir"

Conclusion. Therefore, based on the hierarchy analysis method and with the help of the "Choice" DSS, the selection of a DLS from four alternatives Moodle, ATutor, Sakai, OpenUSS was justified by the following criteria: technical aspects, adaptation, administration, course management, user data management, communication tools, learning objects, usability. The peculiarity of the task of choosing a distance learning system was that the selection criteria could not be expressed in quantitative form, this task belongs to the class of poorly structured tasks and was solved by applying a ranking scale for criteria and alternatives.

To select a platform using the hierarchy analysis method, hierarchy models were built, an expert survey was conducted to determine the importance of certain criteria for choosing a platform and their quantification using a ranking scale, and information was structured by pairwise comparison of criteria and

alternatives. Based on the results obtained, the choice of the best alternative among the considered DLS was substantiated. It turned out to be the Moodle platform.

The reliability of the obtained result is confirmed by determining the consistency index, the value of which does not exceed 0.1, which is a sign of data consistency.

Bibliography:

1. 10 Online Education Trends: 2023 Predictions, Reports & Data. URL: <https://research.com/education/online-education-trends> (дата звернення: 19.03.2023).
2. 8 Best Open Source LMS Platforms 2022 (Compared). URL: <https://themegrill.com/blog/open-source-lms-platforms/> (дата звернення: 3.04.2023).
3. Adem A., Çakıt E., Dağdeviren M. Selection of suitable distance education platforms based on human-computer interaction criteria under fuzzy environment. *Neural Computing and Applications*. 2022. № 34(4). P. 1–13.
4. Cacheiro-gonzalez M. L., Medina-Rivilla A., Dominguez-Garrido M. C., And Medina-Dominguez M. The Learning Platform in Distance Higher Education: Student's Perceptions. *Turkish Online Journal of Distance Education-TOJDE*. 2019. Vol. 20. №. 1. Art. 5. P. 71–95.
5. DSS "Vibor" for Windows. Softportal. URL: <https://www.softportal.com/software-7763-sppr-vibor.html#responses>. (дата звернення: 19.03.2023).
6. Mastan I. A., Sensuse D. I., Suryono R. R., Kautsarina. Evaluation of Distance Learning System (E-Learning): A Systematic Literature Review. *Jurnal TEKNOINFO*. 2022. Vol. 16, №. 1, P. 132–137.
7. Muhammad A. H., Siddique A., Youssef A. E., Saleem K. A Hierarchical Model to Evaluate the Quality of Web-Based E-Learning Systems. *Sustainability*. 2020. № 12. P. 40–71. DOI: 10.3390/su12104071
8. Online College Students Report 2022. URL: <https://insights.educationdynamics.com/2022OnlineCollegeStudentsReport.html> (дата звернення: 3.04.2023).
9. Sudaryono, Untung Rahardja, Masaeni. Decision Support System for Ranking of Students in Learning Management System (LMS) Activities using Analytical Hierarchy Process (AHP) Method. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1477/2/022022/pdf> (дата звернення: 3.04.2023). DOI:10.1088/1742-6596/1477/2/022022
10. Ushakova, I., Dorohov, O., Dorohova, L., Malyarets L. Customer churn predictive modeling by classification method. *Bulletin of the Transilvania University of Brasov*. 2020. Vol 13(62). №. 1. P. 347–362. DOI: 10.31926/but.mif.2020.13.62.1.26
11. Ushakova, I., Skorin, Y., Shcherbakov, A. Methods of quality assurance of software development based on a systems approach. *CEUR Workshop Proceedings*. 2021. № 3200. P. 158–168.
12. Zamora-Antuñano M. A., Rodríguez-Reséndiz J., Cruz-Pérez M. A., Reséndiz H. R., Paredes-García W. J., Gaytán Díaz J. A. Teachers' Perception in Selecting Virtual Learning Platforms: A Case of Mexican Higher Education during the COVID-19 Crisis. *Sustainability*. 2022. Vol. 14 (1). № 195. 19 p. URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/1/195>. (дата звернення: 3.04.2023).
13. Hrabovskiy Y., Brynza N, Vilkhivska O. Development of information visualization methods for use in multimedia applications. *EUREKA: Physics and Engineering*. 2020. № 1. P. 3–17.
14. Ushakova I., Hrabovskiy Ye. Methodology for developing an information site with Workflow support for publishing articles. *Development management*. 2022. № 20(3). P. 20–28. DOI: 10.57111/devt.20(3).2022.20-28
15. Hrabovskiy Y., Fedorchenko V. Development of the optimization model of the interface of multimedia edition. *EUREKA: Physics and Engineering*. 2019. № 3. P. 3–12. DOI: 10.21303/2461-4262.2019.00902.

Ушакова І.О., Грабовський Є.М., Бондаренко Д.О. МОДЕЛЮВАННЯ ТА ВИБІР СИСТЕМИ ДИСТАНЦІЙНОГО НАВЧАННЯ ВИЩОГО НАВЧАЛЬНОГО ЗАКЛАДУ НА ОСНОВІ МЕТОДУ ІЄРАРХІЧНОГО АНАЛІЗУ З ВИКОРИСТАННЯМ СППР

Сьогодні одними із ключових світових трендів освітнього процесу є розширення застосування систем дистанційного навчання (СДН). Найбільшою популярності СДН набувають серед здобувачів вищої освіти. Успішне СДН ґрунтується на правильному виборі програмного забезпечення, відповідного конкретним вимогам, цілям і завданням, які висувуються до нього вищим навчальним закладом. Метою роботи є обґрунтування вибору СДН, яка задовольняє потребам вищих навчальних закладів, на основі моделей та методів аналізу ієрархій та з застосуванням системи прийняття рішень (СППР). Об'єктом дослідження є процеси моделювання та вибору СДН серед наявних на ринку. Предметом дослідження є моделі і методи аналізу ієрархій для вибору системи дистанційного навчання з застосуванням СППР. Дослідження СДН проводилося на основі на основі факторів, які визначають особливості їх використання в навчальному процесі вищих навчальних закладів. Для визначення критеріїв вибору СДН застосовувалися методи групування найбільш суттєвих факторів. Були визначені такі основні критерії: технічні аспекти, адаптація, адміністрування, управління курсами, управ-

ління даними користувачів, інструменти комунікації, навчальні об'єкти, зручність використання. Для аналізу СДН були обрані найбільш популярні на ринку Open Source системи: Moodle, ATutor, Sakai, OpenUSS. Для здійснення експерименту щодо ранжування СДН в залежності від їх пріоритету застосовувався метод аналізу ієрархій. Побудова і експериментальна апробація моделі аналізу ієрархій здійснювалася за допомогою СППР «Вибір». В процесі експерименту було створено модель ієрархій для ранжування СДН, для обраних попередньо критеріїв були визначені значення їх важливості, здійснено парне порівняння елементів ієрархій за їх важливістю, здійснено парні порівняння альтернатив за всіма критеріями. Оригінальність дослідження полягає в визначенні основних критеріїв для вибору СДН та створенні моделі на основі методу аналізу ієрархій для ранжування за пріоритетом СДН. Практична цінність полягає в розробленні методики для обґрунтування вибору СДН, а також в визначенні найбільш прийнятної СДН серед популярних Open Source систем.

Ключові слова: система дистанційного навчання, Open Source система, критерії вибору, метод аналізу ієрархій, система підтримки прийняття рішень.

УДК 631.365.22+621.317

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.2.1/40>

Федотова М.О.

Центральноукраїнський національний технічний університет

Мацуї А.М.

Центральноукраїнський національний технічний університет

Трушаков Д.В.

Центральноукраїнський національний технічний університет

Сербул О.М.

Центральноукраїнський національний технічний університет

Березюк І.А.

Центральноукраїнський національний технічний університет

Скриннік І.О.

Центральноукраїнський національний технічний університет

ТЕХНОЛОГІЯ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ДИНАМІКИ БАГАТОВИМІРНОГО ОБ'ЄКТА ТА ЇЇ ПРИКЛАДНЕ ЗАСТОСУВАННЯ

Розв'язок задачі декомпозиції дозволив представити зерносушарку з киплячим шаром у вигляді множини багатовимірних об'єктів з чистим запізненням. Розмір цієї множини визначається кількістю каскадів, а динамічні характеристики її елементів залежать від відстані решета до шиберу завантаження.

Застосування частотного методу структурної ідентифікації професора Блохіна Л.М. дозволив оцінити модель динаміки зерносушарки з киплячим шаром у вигляді множини систем лінеаризованих звичайних диференціальних рівнянь та множини матриць спектральних щільностей збурень. Кожна з систем рівнянь та кожна матриця спектральних щільностей мають однакову структуру та різні параметри. Закони зміни параметрів в залежності від відстані до шиберу завантаження визначені методом найменших квадратів на основі результатів ідентифікації.

Дана робота присвячена одному з наступних етапів ідентифікації динаміки зерносушарки касетного типу з киплячим шаром як об'єкта автоматизації з розподіленими параметрами із запізненням, в результаті чого було отримано матриці передаточних функцій зерносушарки по-каскадно від її входу до виходу, використовуючи відому технологію структурно-параметричної ідентифікації багатовимірних об'єктів. Вихідними даними для такої технології стали матриці спектральних та взаємносектральних щільностей сигналів «вхід-вихід» сушарки, які були отримані у попередній статті журналу.

Застосувавши методи сепарації, факторизації, виділення полюсів за Девісом – ми отримали опис динаміки зерносушарки з киплячим шаром у розрізі кожного з семи каскадів. Аналіз отриманих даних дозволив стверджувати, що структура матриці передаточних функцій по-каскадно ідентична, а параметри змінюються та ґрунтуються на законах фізики.

Ключові слова: киплячий шар, зерносушарка, автоматизація, матриця передаточних функцій, спектральна щільність.

Постановка проблеми. Сушіння зерна в активну фазу збору врожаю є стратегічною задачею, адже зерно необхідно висушити так, щоб воно зберігалось доволі тривалий період (3-4 роки). Якість зернового матеріалу, що направляється до сховища, залежить не лише від природніх факторів, а й, головним чином, від режимів сушіння. В умовах війни роботи по приведенню зерна в стійкий стан потребують значної швидко-

дії, особливо в зонах з підвищеною небезпекою. Якщо вивезти врожай не вдається, то в нагоді стають мобільні зерносушарки, завдяки яким невеликі партії зерна швидко висушуються до потрібної вологості. Швидким способом сушіння в мобільних зерносушарках є спосіб киплячого шару. Переваги його відомі вже давно [1]. Для забезпечення якісного процесу сушіння в зерносушарці з киплячим шаром (ЗКШ) необхідно роз-

робити систему автоматичного керування, впровадження якої гарантуватиме отримання показників висушеної продукції в межах норми.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Експериментами в області сушіння дисперсних матеріалів, зокрема зернових, та розробкою на їх основі систем автоматизації займалися такі провідні діячі науки та техніки як Федоров В.Г., Баскаков А.С., Рашковська Н.Б., Романков П.Г. та ін. На кафедрі механізації сільського господарства Центральноукраїнського національного технічного університету була розроблена нова конструкція зерносушарки для сушіння дисперсного матеріалу (зерна, насіння соняшника, сої, кукурудзи тощо) в киплячому шарі. Особливістю такої конструкції стали змінні каскади-решета з варійованим кутом їх нахилу відносно горизонталі (в залежності від матеріалу, який потрібно висушити) та осадова камера, що дає можливість сушіння матеріалу безпосередньо з поля уникаючи витрат на попереднє очищення зерна від домішок.

Формулювання цілей статті.

Задача структурно-параметричної ідентифікації ЗКШ як об'єкта автоматизації полягає у тому, щоб за знайденими спектральними щільностями вимірних сигналів [2] S_{S_n, S_h} , S_{TT} , S_{h_k, h_k} , S_{ww} і їх взаємними спектральними щільностями S_{S_n, h_k} , $S_{S_n, w}$, S_{T_w} , $S_{S_n, w}$ та S_{w, h_k} визначити структуру і параметри матриці передаточних функцій (МПФ) F_{11}^k для кожного k-того каскаду зерносушарки з киплячим шаром.

Виклад основного матеріалу.

Для визначення матриць передаточних функцій кожного з елементів множини моделей динаміки зерносушарки і матриць спектральних щільностей (МСЩ) збурень, що діють на відповідний елемент в процесі роботи, був застосований метод ідентифікації з монографії [3]. Відповідно до цієї методики базовою інформацією для розв'язання поставленого завдання є транспоновані матриці СЩ (S_{uu}^k), (S_{xx}^k) та ВСЩ (S_{ux}^k) сигналів «вхід-вихід» зерносушарки, що були сформовані для каскаду з номером k. Застосуємо згадану методику з монографії для нашого випадку, а саме для каскаду № 7.

Враховуючи технологію з монографії [3] та вихідні дані [2] матриці S_{uu}^{-1} , S'_{ux} та S_{xx} для сьомого каскаду мають вигляд:

$$S_{uu}^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{-1718.2642(s+0.05)(s-0.05)(s^2+0.108s+0.0081)(s^2-0.108s+0.0081)}{(s+0.025)(s-0.025)(s+0.4)(s-0.4)} & 0 \\ 0 & \frac{-512.8649(s+0.006)(s-0.006)(s^2+0.096s+0.0064)(s^2-0.096s+0.0064)}{(s+0.5)(s-0.5)(s+0.0055)(s-0.0055)} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$S'_{ux} = \begin{bmatrix} \frac{-0.0003(s+0.025)(s-0.025)(s+0.09)(s+0.4)(s-0.4)}{(s+0.026)(s+0.05)(s-0.05)(s^2+0.108s+0.0081)(s^2-0.108s+0.0081)} \\ 0 \\ \frac{-0.00037(s+0.025)(s-0.025)(s+0.07)(s+0.4)(s-0.4)}{(s+0.009)(s+0.05)(s-0.05)(s^2+0.108s+0.0081)(s^2-0.108s+0.0081)} \\ \frac{-0.00035(s+0.5)(s-0.5)(s+0.07)(s+0.0055)(s-0.0055)}{(s+0.01)(s+0.006)(s-0.006)(s^2+0.096s+0.0064)(s^2-0.096s+0.0064)} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$S_{xx} = \begin{bmatrix} \frac{-0.0009(s+0.09)(s-0.09)(s+0.4)(s-0.4)}{(s+0.05)(s-0.05)(s^2+0.108s+0.0081)(s^2-0.108s+0.0081)} \\ \frac{-0.0022(s+0.0012)(s+0.1)(s^2-0.072s+0.0081)(s^2-0.14s+0.0196)}{(s+0.0015)(s+0.03)(s+0.05)(s-0.05)(s^2+0.108s+0.0081)(s^2-0.108s+0.0081)} \\ \frac{-0.0022(s-0.0012)(s-0.1)(s^2+0.072s+0.0081)(s^2+0.14s+0.0196)}{(s+0.0015)(s-0.03)(s+0.05)(s-0.05)(s^2+0.108s+0.0081)(s^2-0.108s+0.0081)} \\ \frac{-0.010843}{(s-0.012)(s+0.012)} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Далі формуємо матрицю S'_{yy} .

$$S'_{yy} = \begin{bmatrix} -0.0058 \left| \frac{(s+0.4)(s+0.025)}{(s+0.05)(s^2+0.108s+0.0081)} \right|^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.00195 \left| \frac{(s+0.5)(s+0.055)}{(s+0.006)(s^2+0.096s+0.0064)} \right|^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

В результаті факторизації знайденої матриці отримаємо матрицю D

$$D = \begin{bmatrix} \frac{0.024124(s+0.025)(s+0.4)}{(s+0.05)(s^2+0.108s+0.0081)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{0.044157(s+0.5)(s+0.0055)}{(s+0.006)(s^2+0.096s+0.0064)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Факторизація рівняння зв'язку (див монографію) дозволила отримати матрицю $S_{\Delta x}$

$$S_{\Delta x} = \begin{bmatrix} \frac{0.027(s+0.1523)(s^2+0.1357s+0.0071)}{(s+0.05)(s+0.03)(s^2+0.108s+0.0081)} & \frac{0.072894(s+0.026)(s^2+0.036s+0.0088)}{(s+0.012)(s+0.05)(s^2+0.108s+0.0081)} \\ \frac{-0.01025(s+0.003)(s+0.096)}{(s+0.05)(s+0.03)(s^2+0.108s+0.0081)} & \frac{0.072281(s+0.09194)(s^2+0.046s+0.0041)}{(s+0.012)(s+0.05)(s^2+0.108s+0.0081)} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Матриця T має наступну структуру

$$T = \begin{bmatrix} T(1.1) & T(1.2) & T(1.3) & T(1.4) \\ T(2.1) & T(2.2) & T(2.3) & T(2.4) \end{bmatrix}, \quad (6)$$

де складові матриці (6) $T(i,j)$ визначені як

$$\begin{aligned} T(1.1) &= \frac{0.012393(s+0.4)(s+0.09)(s+0.025)}{(s+0.026)(s+0.05)(s^2+0.108s+0.0081)} \\ T(2.1) &= \frac{0.015539(s+0.4)(s-0.07)(s+0.025)}{(s+0.009)(s+0.05)(s^2+0.108s+0.0081)} \\ T(1.2) &= 0 \\ T(2.2) &= \frac{0.0079383(s+0.5)(s+0.07)(s+0.0055)}{(s+0.01)(s+0.006)(s^2+0.096s+0.0064)} \\ T(1.3) &= \frac{0.027247(s+0.1523)(s^2+0.1357s+0.007055)}{(s+0.05)(s+0.03)(s^2+0.108s+0.0081)} \\ T(2.3) &= \frac{0.072894(s+0.02641)(s^2+0.03614s+0.008788)}{(s+0.012)(s+0.05)(s^2+0.108s+0.0081)} \\ T(2.4) &= \frac{0.0723(s+0.09194)(s^2+0.04594s+0.004096)}{(s+0.012)(s+0.05)(s^2+0.108s+0.0081)} \end{aligned}. \quad (7)$$

Виконавши сепарацію виразу (6), знайдемо $T_0 + T_+$

$$T_0 + T_+ = \begin{bmatrix} \{T_0 + T_+\}(1.1) & \{T_0 + T_+\}(1.2) & \{T_0 + T_+\}(1.3) & \{T_0 + T_+\}(1.4) \\ \{T_0 + T_+\}(2.1) & \{T_0 + T_+\}(2.2) & \{T_0 + T_+\}(2.3) & \{T_0 + T_+\}(2.4) \end{bmatrix}, \quad (8)$$

де елементи виразу (8) мають вигляд, поданий нижче:

$$\begin{aligned} \{T_0 + T_+\}(1.1) &= \frac{0.012393(s+0.4)(s+0.09)(s+0.025)}{(s+0.026)(s+0.05)(s^2+0.108s+0.0081)}; \\ \{T_0 + T_+\}(2.1) &= \frac{0.015539(s+0.4)(s-0.07)(s+0.025)}{(s+0.009)(s+0.05)(s^2+0.108s+0.0081)}; \\ \{T_0 + T_+\}(1.2) &= 0; \\ \{T_0 + T_+\}(2.2) &= \frac{0.0079383(s+0.5)(s+0.07)(s+0.0055)}{(s+0.01)(s+0.006)(s^2+0.096s+0.0064)}; \\ \{T_0 + T_+\}(1.3) &= \frac{0.027247(s+0.1523)(s^2+0.1357s+0.007055)}{(s+0.05)(s+0.03)(s^2+0.108s+0.0081)}; \\ \{T_0 + T_+\}(2.3) &= \frac{0.072894(s+0.02641)(s^2+0.03614s+0.008788)}{(s+0.012)(s+0.05)(s^2+0.108s+0.0081)}; \\ \{T_0 + T_+\}(1.4) &= \frac{-0.01025(s+0.003)(s+0.096)}{(s+0.05)(s+0.03)(s^2+0.108s+0.0081)}; \\ \{T_0 + T_+\}(2.4) &= \frac{0.0723(s+0.09194)(s^2+0.04594s+0.004096)}{(s+0.012)(s+0.05)(s^2+0.108s+0.0081)}. \end{aligned}. \quad (9)$$

Кінцевим етапом методики ідентифікації є визначення шуканої блочної матриці Φ . Комбінація виразів (5) і (6) дозволяє відшукати матрицю Φ , що має структуру $\Phi = [F_{11}, F_{12}]$, де МПФ від вектору керування до вектору вихідних координат F_{11} дорівнює

$$F_{11} = \begin{bmatrix} \frac{0.51373e - 05(s + 0.09)}{(s + 0.03)} & 0 \\ \frac{0.64413e - 02(s - 0.07)}{(s + 0.01)} & \frac{0.17955(s + 0.07)}{(s + 0.01)} \end{bmatrix}; \quad (10)$$

а МПФ формувального фільтру збурень F_{12} має вигляд:

$$F_{12} = \begin{bmatrix} \frac{2.7247e-05 (s+0.1523) (s^2 + 0.1357s + 0.007055)}{(s+0.05) (s+0.03) (s^2 + 0.108s + 0.0081)} & \frac{-1.025e-05 (s+0.002993) (s+0.09572)}{(s+0.05) (s+0.03) (s^2 + 0.108s + 0.0081)} \\ \frac{0.072894 (s+0.02641) (s^2 + 0.03614s + 0.008788)}{(s+0.05) (s+0.03) (s^2 + 0.108s + 0.0081)} & \frac{0.072281 (s+0.09194) (s^2 + 0.04594s + 0.004096)}{(s+0.05) (s+0.03) (s^2 + 0.108s + 0.0081)} \end{bmatrix} \quad (11)$$

При відшуканій матриці (11) транспоновану матрицю збурень, які діють на каскаді №7, можна визначити, скориставшись формулою $S'_{\Psi\Psi} = F_{12}F_{12}^*$.

Ідентичні розрахунки були проведені і по решті 6-ти каскадам. Порівняльний аналіз матриць F_{11}^k та F_{12}^k по всім 7-ми каскадам дозволив визначити, що всі вони мають загальну структуру, параметри елементів якої різняться:

$$F_{11}^k = \begin{bmatrix} F_{11}(1,1) & F_{11}(1,2) \\ F_{11}(2,1) & F_{11}(2,2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\alpha_1(\Delta)(s + w_1(\Delta)) e^{-\tau_{S_h h}(\Delta)}}{s + w_2(\Delta)} & 0 \\ \frac{\alpha_2(s - \phi) e^{-\tau_{S_h w}}}{s + p_2} & \frac{\alpha_3(s + \phi) e^{-\tau_{T w}}}{s + p_2} \end{bmatrix}, \quad (12)$$

де $\tau_{S_h h}$, $\tau_{S_h w}$, $\tau_{T w}$ – запізнення між сигналами «вхід-вихід»: шибєр – висота матеріалу на кожному каскаді ($S_h - h$), шибєр – вологість ($S_h - w$), температура – вологість ($T - w$) відповідно.

Варіювання параметрів матриці F_{11}^k у розрізі кожного каскаду зведено до табл. 1, звідки стає видно, що елементи $F_{11}(2,1)$ та $F_{11}(2,2)$ не змінюють своїх коефіцієнтів по-каскадно, на відміну від $F_{11}(1,1)$. Незмінність параметрів можна пояснити тим, що і температура агента сушіння, і вологість матеріалу вимірюються лише в одній точці, а не по-каскадно. А наявність ланки I-порядку в чисельнику і знаменнику їхніх передаточних функцій пояснюється тим, що дана зерносушарка призначена для сушки вологого матеріалу, тому і володіє здатністю накопичувати в собі теплову

енергію (володіє ємністю та інерційністю), в результаті чого відбувається випаровування зайвої вологи спочатку з зовнішніх, а потім і з внутрішніх шарів насіння.

Елемент $F_{11}(1, 1)$ характеризує зв'язок висоти шару насіння зі зміною положення шибєру. Виконавши апроксимацію даних табл. 1 методом найменших квадратів у середовищі Matlab [5], отримані наступні аналітичні вирази

$$\alpha_1(\Delta) = 0,07107 \cdot e^{-0,04036 \cdot \Delta} + 0,06863 \cdot e^{-0,003224 \cdot \Delta}, \quad (13)$$

$$w_1(\Delta) = 0,4482 \cdot e^{-0,147 \cdot \Delta} + 0,1037 \cdot e^{-0,002148 \cdot \Delta}, \quad (14)$$

$$w_2(\Delta) = 0,06535 \cdot e^{-0,1396 \cdot \Delta} + 0,01232 \cdot e^{-0,007514 \cdot \Delta}, \quad (15)$$

$$\tau_{Sh-h}(\Delta) = 33,25 \cdot \Delta + 111,4. \quad (16)$$

Ступінь відповідності отриманих залежностей експериментальним даним характеризують графіки, представлені на рис. 1 разом з 95 відсотковими довірчими границями.

Те, що елемент $F_{11}(1,1)$ представляє собою поєднання аперіодичної та форсуєчої ланок пояснюється інерційністю реагування, яка виникає через властивість каскаду накопичувати зернову масу до деякого значення h (так як кут нахилу решета невеликий і складає 5-8°), розподіляти її по всій площі каскаду, а потім, під дією сили земного тяжотіння, переміщувати її з каскаду на каскад.

Зміна частоти $w_1(\Delta)$ за законом (14) пояснює те, що на швидкість зміни положення регулюючого органу відразу ж реагує перший каскад, а на решту каскадів – через деякий час по мірі потрапляння зерна з першого каскаду, ця швидкість має вплив поступовий і, практично, однаковий. Частота $w_2(\Delta)$ характеризує частоту зрізу каскаду зерносушарки за зміною положення шибєру. На нижньому каскаді, найбільш віддаленому від шибєру завантаження, висота киплячого матеріалу в стані кипіння змінюється найбільш інтенсивно, далі – інтенсивність зміни спадає за законом (16). Коефіцієнт α_1 змінюється згідно виразу (13), адже максимальний вплив регулюючого органу (шибєру) на висоту зерна спостерігається саме на першому

Таблиця 1

Параметри елементів матриці F_{11}^k

Каскад (k)	$\alpha_1, \text{м/м} \times 10^{-1}$	$\alpha_2, \text{\%/м} \times 10^2$	$\alpha_3, \text{\%/}^\circ\text{C}$	$w_1, \text{с}^{-1}$	$w_2, \text{с}^{-1}$	$\phi, \text{с}^{-1}$	$p_2, \text{с}^{-1}$	$\Delta, \text{м} \times 10^{-2}$
№ 1	1.0389	0.64413	0.17955	0.15	0.022	0.07	0.01	15
№ 2	0.83932	0.64413	0.17955	0.1	0.015	0.07	0.01	30
№ 3	0.7166	0.64413	0.17955	0.1	0.018	0.07	0.01	45
№ 4	0.62788	0.64413	0.17955	0.09	0.02	0.07	0.01	60
№ 5	0.55393	0.64413	0.17955	0.085	0.022	0.07	0.01	75
№ 6	0.53007	0.64413	0.17955	0.08	0.025	0.07	0.01	90
№ 7	0.51373	0.64413	0.17955	0.09	0.026	0.07	0.01	105

де каскад № 1 – верхній, каскад № 7 – найнижчий; Δ – відстань між каскадами.

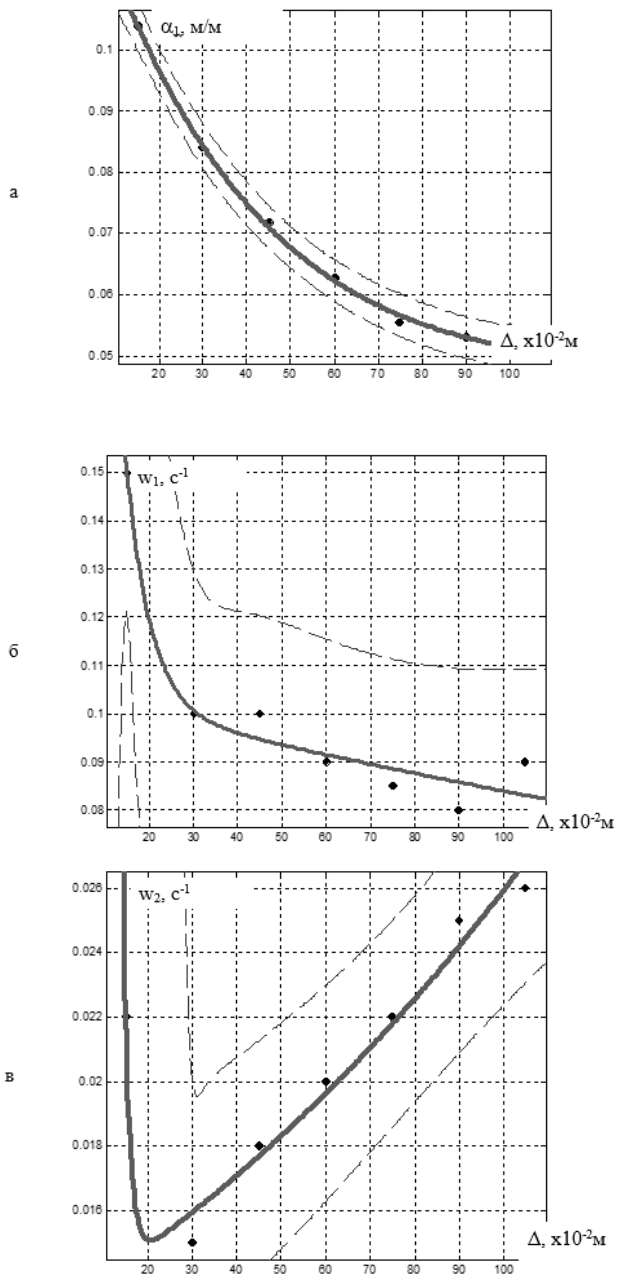


Рис. 1. Апроксимація змінних параметрів елемента $F_{11}(1, 1)$

каскаді (перша точка на графіку), а вже потім, як видно, на інші послідовні решета вплив його спадає за експонентою.

Величина $\tau_{s,h}$ елемента $F_{11}(1, 1)$ являє собою запізнення, і так як розміри 7-ми каскадів ідентичні між собою, то закон зміни описується лінійною функцією (16).

Виходячи з вищезгаданого, висота зернового матеріалу на каскадах змінюється в сукупності з усіма чинниками по-різному, судячи зі зміни параметрів, але загальна структура передаточної функції по каналу S_h-h залишається незмінною.

Застосуємо алгоритм виділення полюсів ліворуч за Девісом [6] з МПФ (12) для визначення матриць P_k і M_k для усіх 7-ми каскадів. Структура поліноміальних матриць P_k ідентична і описується ось так:

$$P_k = \begin{bmatrix} a_{11}(s + \omega_{11}) & a_{12}(s + \omega_{12}) \\ -a_{21}(s + \omega_{11}) & -a_{22}(s + \omega_{12}) \end{bmatrix}, \quad (17)$$

а параметри цієї матриці змінюються по мірі віддалення від шибера завантаження. Характер цієї зміни визначає функція задана таблицею 2.

Тоді обернена матриця P_k^{-1} має наступну структуру:

$$P_k^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{A_{11}}{(s + \omega_{11})} & \frac{A_{12}}{(s + \omega_{11})} \\ -\frac{A_{21}}{(s + \omega_{12})} & -\frac{A_{22}}{(s + \omega_{12})} \end{bmatrix}, \quad (18)$$

де A_{ij} – чисельник елементів матриці (див табл. 3)

Виконаємо деякі легкі перетворення і отримаємо P_k^{-1} , але вже в іншому виді:

$$P_k^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{A_{11}}{\omega_{11}} & \frac{A_{12}}{\omega_{11}} \\ \frac{1}{\omega_{11}} \frac{1}{s + \frac{\omega_{11}}{\omega_{11}}} & \frac{1}{\omega_{11}} \frac{1}{s + \frac{\omega_{11}}{\omega_{11}}} \\ \frac{A_{21}}{\omega_{12}} & \frac{A_{22}}{\omega_{12}} \\ \frac{1}{\omega_{12}} \frac{1}{s + \frac{\omega_{12}}{\omega_{12}}} & \frac{1}{\omega_{12}} \frac{1}{s + \frac{\omega_{12}}{\omega_{12}}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{k_{11}}{(T_{11}s + 1)} & \frac{k_{12}}{(T_{11}s + 1)} \\ -\frac{k_{21}}{(T_{12}s + 1)} & -\frac{k_{22}}{(T_{12}s + 1)} \end{bmatrix}, \quad (19)$$

де T_{11}, T_{12} – сталі часу; $k_{11}, k_{12}, k_{21}, k_{22}$ – коефіцієнти передачі відповідних елементів матриці P_k^{-1} .

Таблиця 2

Значення коефіцієнтів матриці P_k

$\Delta, \text{ м}$ $\times 10^{-2}$	a_{11} $\times 10^3$	a_{12}	a_{21} $\times 10^3$	a_{22}	ω_{11}	ω_{12}
15	83,9599	216,6667	89,8438	252,0114	0,022	0,01
30	297,9483	412,5	223,5294	325,7572	0,015	0,01
45	221,977	253,125	140,2439	173,8294	0,018	0,01
60	219,8316	187,5	114,2857	109,6619	0,02	0,01
75	219,9545	148,9583	96,5608	76,1428	0,022	0,01
90	198,8475	112,5	78,7879	54,8616	0,025	0,01
105	176,3198	112,5	72,2656	56,0782	0,026	0,01

Таблиця 3

Значення елементів матриці P_k^{-1}

$\Delta, \text{ м}$ $\times 10^{-2}$	A_{11} $\times 10^{-3}$	A_{12}	A_{21} $\times 10^{-3}$	A_{22}
15	0,14888	0,128	0,053077	0,049601
30	0,067126	0,085	0,046061	0,061395
45	0,056312	0,082	0,045432	0,07191
60	0,04094	0,07	0,042667	0,08207
75	0,032204	0,063	0,040839	0,093027
90	0,026821	0,055	0,038519	0,097214
105	0,031902	0,064	0,041111	0,10031

Таблиця 4

Значення елементів матриці M_k по-каскадно

$\Delta, \text{ м}$ $\times 10^{-2}$	α_{11} $\times 10^{-2}$	α_{12}	α_{21} $\times 10^{-2}$	α_{22}	γ_{11}	γ_{12}	γ_{21}
15	226,7874	38,9025	255,6668	45,2487	0,01462	0,01032	0,07
30	515,7776	74,0644	397,4427	58,4897	0,01242	0,01025	0,07
45	322,1141	45,4486	212,4675	31,211	0,01395	0,01041	0,07
60	258,8022	33,6656	142,3942	19,6898	0,01533	0,01063	0,07
75	217,7879	26,7455	102,5338	13,6714	0,01671	0,01086	0,07
90	177,8677	20,1994	77,1011	9,8504	0,01889	0,01125	0,07
105	163,0454	20,1994	73,2467	10,0688	0,01889	0,0111	0,07

Матриця M_k має в своєму складі запізнення по основним каналам керування і вигляд її загальний для всіх каскадів ($\tau_1 = \tau_{S,h}$; $\tau_2 = \tau_{S,w}$; $\tau_3 = \tau_{T,w}$)

$$M_k = \begin{bmatrix} \alpha_{11}(s + \gamma_{11})e^{-\tau_1 s} & \alpha_{12}(s + \gamma_{12})e^{-\tau_2 s} \\ -\alpha_{21}(s + \gamma_{21})e^{-\tau_3 s} & -\alpha_{22}(s + \gamma_{12})e^{-\tau_3 s} \end{bmatrix} \quad (20)$$

Параметри елементів матриці M_k змінюються при зміні відстані до шибера заванта-

ження, що можна відобразити за допомогою табл. 4

Висновки. Застосування розробленої методики структурно-параметричної ідентифікації і відповідного їй програмно-технічного комплексу дозволило визначити структуру і параметри МПФ ЗКШ, дослідити та проаналізувати зміну параметрів елементів матриці передаточних функцій у розрізі кожного каскаду

Список літератури:

1. Федотова М.О. Автоматизація процесу стабілізації висоти киплячого шару насіння у зерносушарці за неповними вимірами: дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук: 05.13.07. Кропивницький, 2017. 276 с.
2. Федотова М.О., Скриннік І.О., Дідик О.К., Березюк І.А., Зубенко В.О., Сербул О.М., Трушаков Д.В. Технологія ідентифікації сигналів зерносушарки з киплячим шаром як об'єкта автоматизації та її практична реалізація Науковий журнал «Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки» Том 33 (72) № 2, 2022, с. 133-140
3. Азарсков В.Н. Методология конструирования оптимальных систем стохастической стабилизации / В.Н. Азарсков, Л.Н. Блохин, Л.С. Житецкий, монография. К.: НАУ, 2006. 438 с
4. Trushakov, D., Kozlovskiy, O., Rendzinyak, S., Fedotova, M., Korud, V. Automated System for Measuring the Temperature of the Desiccator Proceedings of 2020 IEEE 21st International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering, CPEE 2020, 2020, 9238716 Conference Paper.
5. Федотова М.О., Скриннік І.О., Осадчий С.І., Трушаков Д.В. Ідентифікація сигналів як один з етапів синтезу системи стабілізація висоти киплячого шару в зерносушарці «Системні технології» 4 (135) 2021 «System technologies» [DOI 10.34185/1562-9945-4-135-2021-09]
6. M.C. Davis, Factoring the spectral matrix, IEEE Trans. Automat. Control 8 (1963).

Fedotova M.O., Matsui A.M., Trushakov D.V., Serbul O.M., Berezyuk I.A., Skrynnik I.O. TECHNOLOGY OF IDENTIFICATION OF THE DYNAMICS OF A MULTIDIMENSIONAL OBJECT AND ITS APPLICATION

The solution of the decomposition problem made it possible to present a grain dryer with a fluidized bed in the form of a set of multidimensional objects with a net delay. The size of this set is determined by the

number of cascades, and the dynamic characteristics of its elements depend on the distance of the sieve to the loading shutter.

Application of the frequency method of structural identification of professor L.M. Blokhin. made it possible to evaluate the model of the dynamics of a fluidized bed grain dryer in the form of a set of systems of linearized ordinary differential equations and a set of matrices of spectral densities of disturbances. Each of the systems of equations and each matrix of spectral densities have the same structure and different parameters. The laws of changing parameters depending on the distance to the loading shutter are determined by the method of least squares based on the identification results.

This work is devoted to one of the next stages of identifying the dynamics of a fluidized-bed cassette type grain dryer as an automation object with distributed parameters with a delay, as a result of which the matrices of the transfer functions of the grain dryer were obtained in a cascade from its input to the output, using the well-known technology of structural-parametric identification of multidimensional objects. The initial data for this technology became the matrices of the spectral and cross-spectral densities of the "input-output" signals of the dryer, which were obtained in the previous article of the magazine.

By applying the methods of separation, factorization, allocation of poles according to Davis, we obtained a description of the dynamics of a grain dryer with a fluidized bed in a section of each of the seven cascades. The analysis of the obtained data made it possible to state that the structure of the matrix of transfer functions is identical in cascade, and the parameters change and are based on the laws of physics.

Key words: *fluidized bed, grain dryer, automation, matrix of transfer functions, spectral density.*

Чумаченко С.М.

Національний університет харчових технологій

Кутовий О.П.

Центр воєнно-стратегічних досліджень

Національного університету оборони України імені Івана Черняхівського

Гуйда О.Г.

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

Попель В.А.

Державний науково-дослідний інститут технологій кібербезпеки та захисту інформації

Зайка Н.В.

Державний науково-дослідний інститут технологій кібербезпеки та захисту інформації

КОМПЛЕКСНИЙ ПІДХІД ДО ВИЗНАЧЕННЯ РІВНЯ БЕЗПЕКИ КРИТИЧНОЇ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ НА ОСНОВІ ІНТЕГРАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ЗАХИСТУ ЇЇ ОБ'ЄКТІВ ВІД БПЛА ТА КРИЛАТИХ І БАЛІСТИЧНИХ РАКЕТ

В роботі проведено аналіз відомих підходів експертного оцінювання рівнів безпеки, пов'язаних із застосуванням безпілотних літальних апаратів для розвідки, крилатих і балістичних ракет для ураження об'єктів критичної енергетичної інфраструктури пошкодження та віддаленої кібератаки по ним.

Безпека і захист критичної енергетичної інфраструктури займають сьогодні ключове місце в системі національної безпеки і оборони України у зв'язку з масованими атаками на неї російського агресора. В першу чергу, це пов'язане із ключовим значенням енергетики і її визначальним впливом на загальний рівень безпеки всієї критичної інфраструктури (КІ)

В умовах сучасної науково-технічної революції у військовій сфері, що активно продовжується з першої половини 3-го тисячоліття, все більшого значення набуває пошук ефективних засобів протидії з більш оснащеним в технічному плані супротивником, який широко використовує новітні інформаційні технології для атак на об'єкти критичної енергетичної інфраструктури. Враховуючи досвід гібридних війн в Іраку, Югославії, Сирії і Україні, характерним є застосування засобів повітряного нападу із бомбардувальної авіації (стратегічної й фронтової), корабельних (надводних і підводних) та наземних систем базування, що знаходяться поза зоною можливого ураження.

До чинників, що призводить до похибок оцінки цих загроз, є вирішення задачі своєчасного виявлення повітряних засобів нападу та постановки їм перешкод. Проблеми виявлення та розпізнавання цілей обумовлені їх малими масо-габаритними характеристиками, що ускладнює їх виявлення навіть на невеликих відстанях. Це стосується як радіолокаційних так і оптико-електронних засобів розвідки. Крім того, сам процес виявлення цілей залежить від ступеню його автоматизації. Процес ураження цілей залежить від точності наданих координат засобам ураження та їх тактико-технічних характеристик щодо точності прицілювання.

Пропонується розглянути інформаційну модель оцінки ефективності комплексу засобів захисту об'єктів критичної інфраструктури за критерієм ефективність-вартість, що допоможе приймати обґрунтовані рішення щодо побудови оптимальних схем захисту критичної інфраструктури і боротьби з повітряними засобами ураження критичної енергетичної інфраструктури.

Ключові слова: критична інфраструктура, ефективність, рівень ефективності, безпілотний літальний апарат, радіолокаційна станція, радіоелектронна боротьба, критерій, ваговий коефіцієнт.

Постановка проблеми. Застосування крилатих і балістичних ракет призводить до різкого росту загрози безповоротного ураження об'єктів критичної енергетичної інфраструктури (ОКЕІ), основні елементи якої є критично важливими для забезпечення життєдіяльності населення та об'єктів оборонно-промислового комплексу в Україні (див. рис. 1).

Ще один із засобів ураження представляє собою безпілотні літальні апарати (БПЛА), або дрони, які є досить новими видами озброєнь на полі бою. Починаючи з 1980-х років їх активно використовують збройні сили провідних країн світу і вже з'явилися результати їх ефективного застосування в останніх військових конфліктах.

Бурний розвиток БПЛА призвів до появи багатьох їх різновидів – від розвідників до ударних дронів-«камікадзе», які відрізняються за розмірами та цільовим навантаженням. Відеокадри, що передають дрони-розвідники, і закладені у їх бортовий комп'ютер алгоритми маневрування та

виявлення нових шляхів наближення до цілей, збільшують ризики проведення результативної атаки по ОКЕІ та їх ураження. Застосування групи дронів прикриття та ретрансляторів збільшує небезпечну зону віддаленої атаки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз публікацій за напрямом протидії крилатим, балістичним ракетам і БПЛА показує, що наукових статей з даної тематики на сьогодні досить багато. У переважній більшості робіт в цій сфері переважають надмірно оптимістичні висновки щодо успішності ураження всіх їх видів сучасними засобами ППО та РЕБ [1-3]. Разом з тим, різке та різноманітне вторгнення цих засобів ураження КІ в сучасні бойові дії, їх стрімкий технологічний розвиток виявили проблему ефективної боротьби з ними, особливо з малими БПЛА, яка на даний час залишається надзвичайно складною. Тільки одиниці держав світу мають частково в наявності та розвивають засоби, які спроможні достатньо ефективно протидіяти застосуванню сучасних БПЛА.

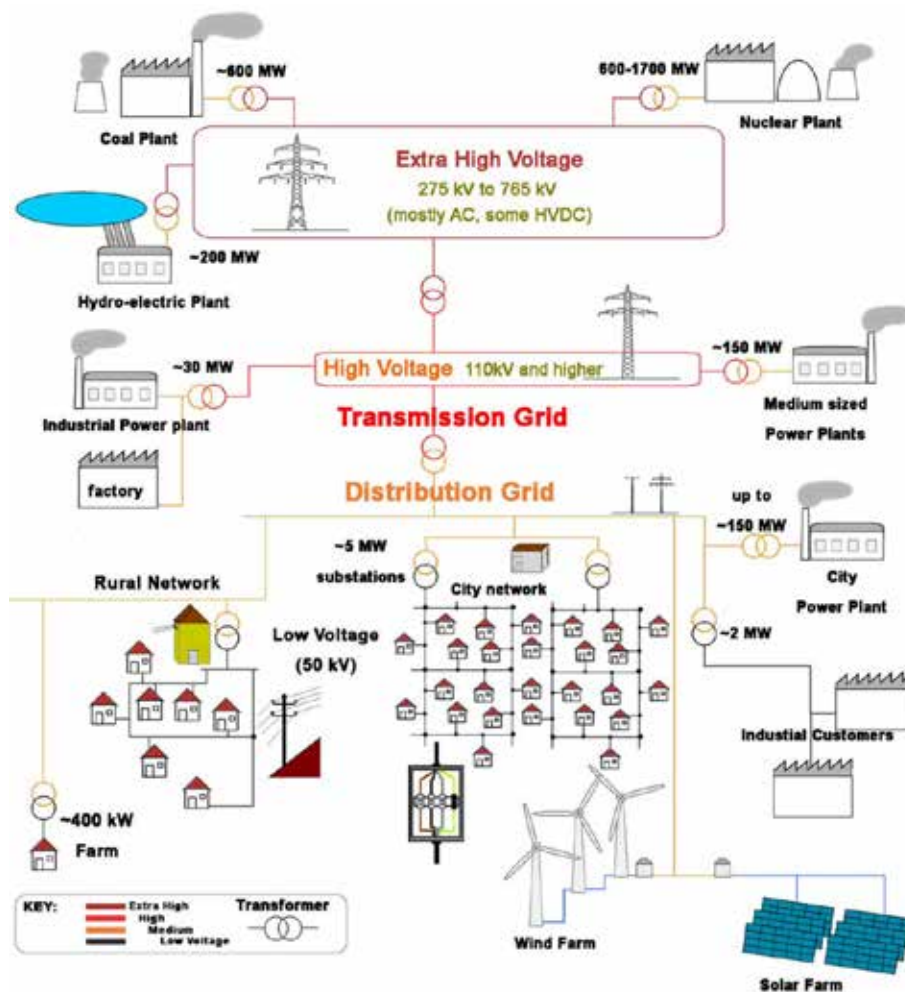


Рис. 1. Схема розподілення мережі та об'єднання об'єктів критичної енергетичної інфраструктури

Встає питання у об'єктивному порівнянні ефективності технічних рішень щодо захисту КІ і боротьби з сучасними та перспективними БПЛА, крилатими і балістичними ракетами з обґрунтуванням їх ефективності.

Поява нових видів ураження КІ, серед яких слід окремо виділити БПЛА та їх застосування в останніх воєнних конфліктах, виявили суттєві недоліки зенітно-ракетних комплексів (ЗРК), що стоять на озброєнні в різних країнах світу. Аналіз характеристик ЗРК протиповітряної оборони (ППО) провідних країн світу показує, що багато різноманітних заявлених комплексів ППО нібито здатні вражати як БПЛА, так і крилаті ракети «повітря-земля», балістичні ракети, літаки, вертольоти. Однак, треба усвідомлювати, що боротьба з БПЛА різних класів суттєво відрізняється. Так, дійсно БПЛА великих та середніх розмірів (типу Predator и Reaper від General Atomics) виявляються, супроводжуються та вражаються з досить високою ефективністю, а з БПЛА малих розмірів виникають суттєві проблеми. В [2] відмічається, що для виявлення малорозмірних БПЛА необхідно застосовувати спеціалізовані засоби розвідки, що мають кращі можливості виявлення та супроводження малорозмірних БПЛА, створювати спеціалізовані канали першочергової передачі розвідувальної інформації про їх дії.

Як правило, для протидії крилатим ракетами та дронам-камікадзе, перспективними є способи впливу на використання високотехнологічних інформаційних систем визначення навігаційних параметрів космічного базування і зокрема Глобальних Систем Позиціонування (ГСП) (GPS/GLONASS), супутникові угруповання яких були розгорнуті США і Росією.

Бойові дії в зоні Перської затоки спочатку показали високі експлуатаційні характеристики ГСП. Однак, у ході конфлікту в Іраку на території останнього було встановлено кілька достатньо потужних передавачів для постановки перешкод системі GPS. Внаслідок їх дії в перші три дні конфлікту за наявними даними коаліційні сили втратили значну кількість крилатих ракет. Після визначення причин зниження ефективності ураження обстріли було припинено. Розташування передавачів було встановлено, передавачі було знищено, що дозволило продовжувати бойові дії з високою ефективністю.

Принциповою особливістю ГСП є їхня слабкість до активних перешкод. Це чітко фізично обумовлено трьома чинниками [3]:

– великою дальністю передачі сигналів (~20 000 км);

– обмеженою потужністю радіосигналу супутника (10...50 Вт);

– малим коефіцієнтом посилення антени супутникового передавача (що зазвичай не перевищує 10–15 дБ) [5].

Мета статті – дослідження науково-методичного апарату для оцінювання ефективності системи захисту ОКЕІ від БПЛА та проведення техніко-економічного аналізу запропонованих технічних рішень ведення боротьби з ними за критерієм ефективність-вартість.

Викладення основного матеріалу. Кожна технічна система (комплекс) захисту ОКЕІ й боротьби з БПЛА, як складна система, повинна мати у своєму складі ряд технічних складових (підсистем), поєднаних у єдине ціле.

Кожна складна система складається з підсистем, що мають своє цільове призначення. Умовно, у складі складних технічних систем виділяють за призначенням інформаційну, керуючу, виконавчу підсистеми та підсистему забезпечення. Їх спільна робота і повинна забезпечити ефективну роботу всієї системи захисту ОКЕІ і боротьби з БПЛА.

Зрозуміло, що кожна з наведених підсистем повинна працювати належним чином, з відповідною ефективністю. Їх розробка та виготовлення потребують певного фінансування та визначають кінцеву вартість всієї складної системи. Таким чином, виникає потреба оцінки ефективності складної системи захисту ОКЕІ і боротьби з БПЛА шляхом оцінки ефективності роботи складових підсистем з оцінкою їх вартісних показників. Вважається, що «ефективністю» є спроможність системи утворювати системний ефект, але така спроможність має кількісну міру. Виходячи з цього, ефективність технічної системи безпеки ОКЕІ і боротьби з БПЛА (протидії) можна оцінити як результат (або рівень) функціонування всіх чотирьох підсистем, який прагне до максимального значення, за формулою:

$$E_{ТС}^{захисту} = E_j(i) = E_1^{B_1} \times E_2^{B_2} \times E_3^{B_3} \times E_4^{B_4} \rightarrow max, \quad (1)$$

де $E_1^{B_1}, E_2^{B_2}, E_3^{B_3}, E_4^{B_4}$ – відповідно, ефективності інформаційної, керуючої, виконавчої підсистем та підсистеми ресурсного забезпечення;

B_1, \dots, B_4 вагові коефіцієнти критеріїв ефективності інформаційної, керуючої, виконавчої підсистем та підсистеми ресурсного забезпечення

$$\sum_{j=1}^4 B_j = 1.$$

Вагові коефіцієнти B_j цільових (часткових) критеріїв ефективності наведених підсистем зазвичай визначаються експертним шляхом

з використанням методу аналізу ієрархій Сааті або методу аналітичних мереж [6, 7] (і тільки при неможливості проведення експертного опитування, ваги усіх часткових критеріїв приймаються рівновагими $B_j = 1 / 4$).

За результатами оцінки ефективності способів протидії БПЛА доцільним є подальше порівняння способів за критерієм «ефективність – вартість». Оцінка використання декількох способів протидії зводиться до формування єдиного критерію шляхом згортки цільових критеріїв кожної з підсистем.

Авторами запропонована шкала оцінки ефективності системи безпеки ОКЕІ і боротьби з БПЛА, що наведена у таблиці 1.

Таблиця 1

Шкала оцінки ефективності системи боротьби з БПЛА і КР

Рівень ефективності	Значення показника
Дуже ефективна	$E_{ТС}^{захисту} \geq 0,8$
Ефективна	$0,8 > E_{ТС}^{захисту} \geq 0,6$
Недостатньо ефективна	$0,6 > E_{ТС}^{захисту} \geq 0,4$
Неефективна	$0,4 > E_{ТС}^{захисту} \geq 0,2$
Дуже неефективна	$E_{ТС}^{захисту} < 0,2$

Оцінка необхідної потужності передавача перешкод

Приймальний пристрій GPS перебивається сигналом перешкоди в тому випадку, якщо відношення потужності перешкоди, що потрапляє на вхід приймача, до потужності корисного сигналу, що надходить від супутників не менше деякої величини, яка називається коефіцієнтом придушення (Кп), характерного для даної перешкоди та конкретного типу приймача GPS. Інакше висловлюючись, перешкода ефективна, якщо виконується умова

$$\frac{P_{п\ вх}}{P_{с\ вх}} \geq K_{п} \quad (1)$$

де $P_{п\ вх}$, $P_{с\ вх}$ – потужність перешкоди та корисного сигналу на вході приймача GPS відповідно.

Коефіцієнт придушення залежить від виду перешкоди та технічних характеристик GPS приймача. Зазвичай для шумової перешкоди приймають $K_{п} = 0,5 \dots 1$. При формуванні хибних кодів для дезінформації роботи приймачів GPS рівень сигналів на вході приймачів повинен бути того ж порядку, що й рівні сигналів, що приймаються від супутників GPS.

Проведемо оцінку необхідної потужності передавача перешкод, що забезпечує виконання умови 1.

Нехай передавач перешкод потужністю $P_{прд}$ із коефіцієнтом посилення його антени $G_{прд}$ опро-

мінює приймач з ефективною площею антени $S_{эф\ прм}$, віддалений від нього на відстань R .

Щільність потужності випромінювання у приймача $P_R [Вт/м^2]$ визначається ставленням потужності $P_{прд}$ до площі поверхні сфери радіусу, яке має бути збільшено в $G_{прд}$ разів:

$$P_R = (P_{прд} \eta / 4\pi R^2) G_{прд},$$

де η – коефіцієнт втрат серед поширення.

Потужність сигналу перешкоди на вході приймача GPS дорівнюватиме :

$$P_{п\ вх} = P_R S_{эф\ прм} = P_{прд} G_{прд} S_{эф\ прм} \eta / (4\pi R^2). \quad (2)$$

Використовуючи відоме співвідношення

$$S_{эф\ прм} = G_{прм} \lambda^2 / 4\pi$$

де λ – довжина хвилі), отримуємо:

$$P_{п\ вх} = P_{прд} G_{прд} G_{прм} \lambda^2 \eta / (4\pi)^2 R^2. \quad (3)$$

Враховуючи вирази 1 і 3 знаходимо необхідну потужність передавача перешкоди

$$P_{прд} = (4\pi)^2 R^2 P_{прм\ min} K_{п} / G_{прд} G_{прм} \theta(\beta, \epsilon) \lambda^2 \eta, \quad (4)$$

де $P_{прм\ min}$ – реальна чутливість приймача GPS, $\theta(\beta, \epsilon)$ – рівень пелюсток діаграми спрямованості антени приймача GPS за якими впливає перешкода.

Для оцінки необхідної потужності передавача перешкод, що забезпечує придушення приймача GPS, задамо значення параметрів, що входять у формулу 4:

$$R = 100 \text{ км}, P_{прм\ min} = 10^{-12} \text{ Вт}, K_{п} = 1, G_{прд} = 500, G_{прм} = 5;$$

$$\lambda = 19 \text{ см}, 24 \text{ см}; \eta = 1; \theta(\beta, \epsilon) = 1.$$

Тоді, необхідна потужність передавача перешкод дорівнюватиме $\approx 0,01$ Вт. Даної потужності достатньо для придушення приймача GPS по головному пелюстку діаграми спрямованості ($\theta(\beta, \epsilon) = 1$). Таке придушення можливе у разі розміщення передавача перешкод на борту якогось літального апарату (наприклад БПЛА). У разі впливу на бічні пелюстки потрібна потужність передавача повинна бути збільшена з урахуванням реального рівня бічних пелюсток антени приймача GPS. Реальні значення рівнів бічних пелюсток антен приймачів GPS знаходяться в межах $10^{-2} \dots 10^{-3}$. Отже, необхідна потужність передавача перешкод для придушення приймача GPS на відстані до 100 км по бічних пелюстках антени не перевищує 10 Вт.

Для перевірки викладених припущень було реалізовано імітаційну модель автокомпенсатора перешкод, що знаходиться у складі приймача ГСП [4].

Потужність джерел перешкод в імітаційній моделі у 1000 разів перевищує потужність власних шумів автокомпенсатора приймачів ГСП, що

відповідає потужності, що приймається антенами приймачів ГСП від джерела перешкод потужністю 10 Вт і що знаходиться на дальності близько 100 км (коефіцієнт посилення антени передавача перешкод вважали рівним 10 дБ). Модуляція потужності передавача перешкод здійснювалася згідно із законом:

$$P_i(t) = P_o \cdot (1 + \cos(2 \cdot \pi \cdot f_m \cdot t + \varphi_o)), \quad (1)$$

де: P_o – задане значення потужності; f_m – частота модуляції перешкоди;

φ_o – початкова фаза перешкоди.

Отримані у [6] результати вказують на те, що використання нової завадостійкої системи супутникової навігації робить ГСП практично невразливою для засобів радіоелектронного придушення (РЕП).

Застосування модуляції сигналів передавачів перешкод з розумно вибраною частотою модуляції значно знижує ефективність роботи автокомпенсаторів приймачів ГСП.

Одночасне використання кількох передавачів перешкод з різних напрямків відносно об'єктів критичної енергетичної інфраструктури (ОКЕІ), навіть у кількості менших ступенів свободи автокомпенсатору приймача ГСП, призводить до зменшення коефіцієнта придушення автокомпенсатора на 20–30 дБ, а застосування взаємнокорельованих перешкод знижує ефективність автокомпенсатора до 7 дБ.

Виграш щодо «сигнал/перешкода+шум» у 5 разів (7дБ) скоротить дальність придушення приймача ГСП у 2,24 рази, тобто для прикладу із

145 км (як вказувалося в [4]) до 64,78 км для 4 Вт передавача.

Можна вважати, що ефективність застосування високоточної зброї по ОКЕІ, на якій є приймачі ГСП, у результаті дії ППО виявиться дуже низькою. Причому сторона, що атакує, може розкрити цей факт тільки після застосування цієї зброї, зазнавши значних матеріальних витрат на ураження ОКЕІ, що представляють собою систему точкових та розподілених об'єктів по всій території України (див. рис. 2).

Приймачі ГСП, що використовуються для навігації в наземних, морських і повітряних бортових інформаційно-управляючих комплексах і військовій техніці теж будуть піддаватися впливу ППП.

Отже, бойове застосування супротивником озброєння і військової техніки яка оснащена приймачами ГСП по ОКЕІ виявиться або під зривом взагалі, що призведе до невиконання бойових завдань, або навіть призведе до аварій, катастроф, внаслідок значних помилок у визначенні реального місцезнаходження.

Вплив ППП практично важко розкрити на фоні значної кількості працюючих передавачів супутників ГСП (десятки) і порівняно невеликої потужності випромінювання самими ППП (одиниці ватів), що робить їх мало помітними, слабко уразливими і несподіваними в застосуванні.

ППП можуть працювати автономно, у складі існуючих зразків озброєння і техніки, існуючих

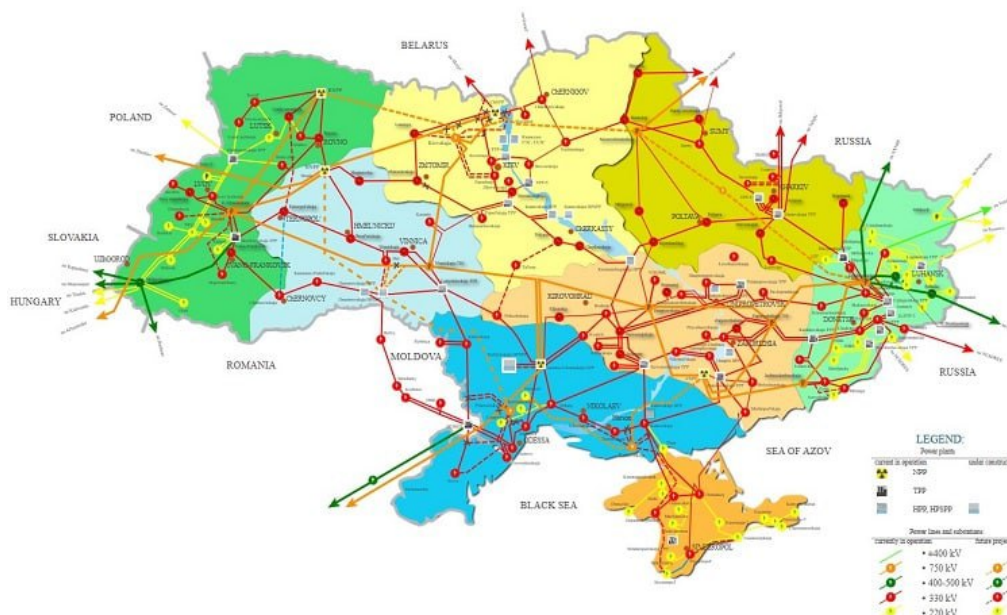


Рис. 2. Об'єкти критичної енергетичної інфраструктури України

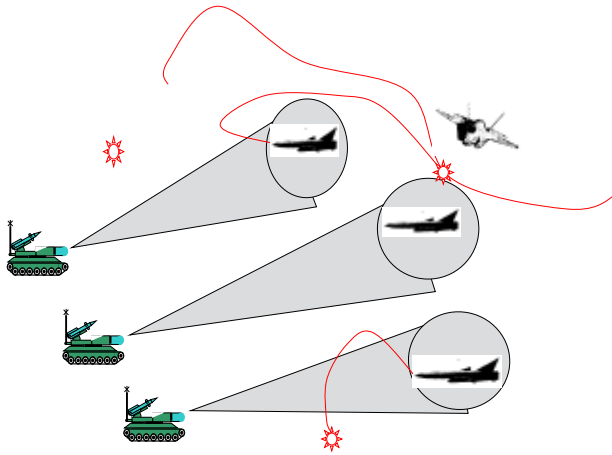


Рис. 3. Придушення роботи приймачів ГСП КР і БПЛА

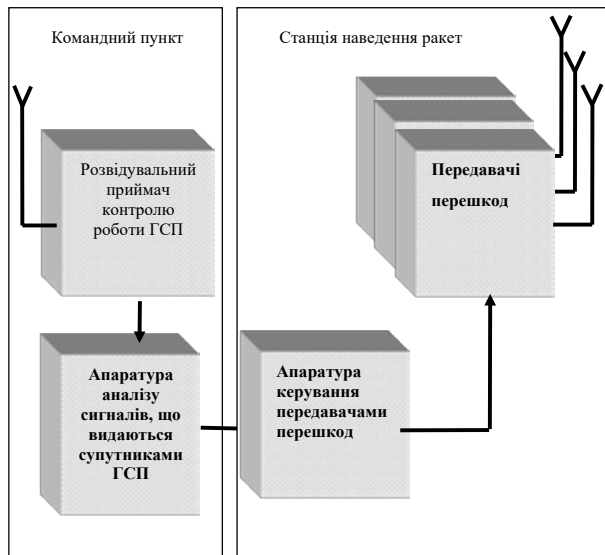


Рис. 4. Структурна схема ТСБ ГСП для ОКЕІ застосування глобальних систем визначення положення

систем озброєння з розвинутою інфраструктурою (наприклад системи ППО) або у складі перспективної Територіальної Системи Блокування ГСП для ОКЕІ в Україні. Найбільша ефективність може бути досягнута у випадку їхнього використання в складі ТСБ ГСП. У цьому випадку

забезпечується детальний аналіз роботи супутників ГСП, вибір оптимальних режимів роботи передавачів перешкод і безпосереднє керування режимами і часом їхньої роботи.

ТСБ ГСП найбільш ефективно може бути інтегрована з системою ППО прикриття ОКЕІ. Можливість такого інтегрування обумовлена наявністю розвинутих підсистем розвідки повітряних цілей та автоматизованого управління в системі озброєння ППО, що забезпечує найбільш швидке реагування на зміни умов повітряної обстановки. При цьому зенітні комплекси ППО, оснащені ППП можуть здійснювати вплив на засоби повітряного нападу ОКЕІ постійно, як поза зонами ураження вогневих засобів, так і в зонах ураження. Зважаючи на невеликі масо-габаритні характеристики ППП, вони можуть бути розташовані безпосередньо на бойових засобах ППО (див. рис. 3) або самостійно шляхом створення безпроводної сенсорної мережі для створення сенсорного поля покриття ОКЕІ (див. рис. 4).

Попередні розрахунки та випробування показали, що одного передавача перешкод потужністю (8–10) Вт достатньо для спрямованого придушення роботи приймачів ГСП на відстанях до 100 км.

Висновки. Засоби боротьби та протидії з БПЛА доцільно розглядати з системних позицій. Кожна з чотирьох підсистем, що входять до складу технічної системи безпеки ОКЕІ і боротьби з БПЛА, вносить свій внесок у ефективність цієї системи, що у свою чергу допомагає виявляти найбільш ефективні способи боротьби та протидії в різних умовах обстановки.

Передавач перешкод повинен формувати декілька типів сигналів, які забезпечать вплив на роботу усіх типів приймачів супутникових навігаційних систем. Склад та характеристики цих сигналів потребують додаткових досліджень.

Вартість територіальної системи блокування роботи Глобальних систем визначення положення (GPS) залежить від її складу, необхідної площі прикриття, кількості і характеристик передавачів.

Список літератури:

1. Cang Liang, Ning Cao, Xiaokai Lu, Youjie Ye. UAV Detection Using Continuous Wave Radar // 2018 IEEE International Conference on Information Communication and Signal Processing (ICICSP), 28-30 Sept. 2018, Singapore. DOI:10.1109/ICICSP.2018.8549736
2. Sineglazov V.M. Complex structure of UAVs detection and identification // Electronics and Control Systems, 2015, no. 3 (45), С. 28–32.
3. Абламейко, С. В. Глобальні навігаційні супутникові системи / С. В. Абламейко, В. А. Сасчніков, А. А. Спиридонів. Мінськ: БДУ, 2011. 147 с. ISBN 978-985-518-538-4.
4. Монзінго, Р. А. Адаптивні антенні решітки: введення в теорію / Р. А. Монзінго, Т. У. Міллер. М.: Радіо та зв'язок, 1986. 448 с.

5. Igor Korobiichuk, Yuriy Danik, Oleksyj Samchyshyn The estimation algorithm of operative capabilities of complex countermeasures to resist UAVs // Simulation: Transactions of the Society for Modeling and Simulation International, 7 August 2018, vol. 95, pp. 569–573. DOI: 10.1177/0037549718791264.

6. Чумаченко С.М., Троцько В.В. Оцінювання загроз об'єктам критичної інфраструктури. К.: УкрНДІЦЗ. Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека. 2017. № 1 (3). С. 41–47.

7. Чумаченко С.М., Мурасов Р.К. Методика оцінювання загроз для потенційно-небезпечних об'єктів критичної інфраструктури в зоні проведення операції об'єднаних сил – Труди університету, № 1(170) 2022, С. 228–243. Інв. 49648.

Chumachenko S.M., Kutovoi O.P., Guida O.G., Popel V.A., Zaika N.V. COMPREHENSIVE APPROACH TO DETERMINING THE LEVEL OF SECURITY OF CRITICAL ENERGY INFRASTRUCTURE BASED ON AN INTEGRATED PROTECTION SYSTEM AGAINST UAV AND GUIDED BALLISTIC MISSILES.

The paper analyzes known approaches to expert assessment of security levels related to the use of unmanned aerial vehicles for reconnaissance, cruise and ballistic missiles for attacking critical energy infrastructure objects, and remote cyber attacks on them.

Today, security and protection of critical energy infrastructure occupy a key place in the system of national security and defense of Ukraine, in connection with the massive attacks on it by the Russian aggressor. This is primarily due to the key importance of energy and its decisive impact on the overall level of security of all critical infrastructure.

In the context of the modern scientific and technological revolution in the military sphere, which has been actively ongoing since the first half of the 3rd millennium, the search for effective means of combating a technically advanced opponent who widely uses new information technologies to attack critical energy infrastructure objects is becoming increasingly important. Taking into account the experience of hybrid wars in Iraq, Yugoslavia, Syria, and Ukraine, the use of air attack means from bombing aviation (strategic and frontline), ship-based (surface and underwater), and ground-based systems located outside the possible impact zone is typical.

Among the factors that lead to errors in assessing these threats is the problem of timely detection of aerial attack vehicles and setting up obstacles for them. Target detection and recognition issues are due to their small size and dimensions, which complicates their detection even at short distances. This applies to both radar and optoelectronic reconnaissance systems. In addition, the target detection process depends on the degree of its automation. The targeting process depends on the accuracy of the coordinates provided to the targeting systems and their tactical and technical characteristics regarding accuracy of aiming.

Proposed is to consider an information model for evaluating the effectiveness of a complex of protection means for critical infrastructure objects based on the effectiveness-cost criterion, which will help make informed decisions regarding the construction of optimal schemes for protecting critical infrastructure and combating air attack means on critical energy infrastructure.

Key words: *critical infrastructure, effectiveness, level of effectiveness, unmanned aerial vehicle, radar station, electronic warfare, criterion, weight coefficient.*

ЕНЕРГЕТИКА

УДК 536.24:533.6.011

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.2.1/42>

Баранюк О.В.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Воробйов М.В.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Кінзерський А.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОГІДРАВЛІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОДОГРІЙНОГО КОТЛА ПРИ СПАЛЮВАННІ ПАЛИВНИХ ПЕЛЕТ З ТВЕРДИХ СОРТІВ ДЕРЕВИНИ

У статті розглянуто процеси спалювання пелет в водогрійному котлі з метою визначення його теплогідрравлічних характеристик в залежності від зміни параметрів процесу горіння. Параметри процесу горіння, а саме співвідношення подачі компонентів горіння: палива та повітря-окисника визначають повноту згорання палива та втрати з хімічним та механічним недопалом. Для організації повного згорання палива, особливо для умов роботи конкретного обладнання, потрібно поглибити розуміння фізико-хімічних процесів, що відбуваються під час спалювання пелет для конкретного котельного агрегату. Автори використовуючи метод CFD-моделювання розробили комп'ютерну модель пелетного пальника для твердопаливного котла VIADRUS A0C потужністю 20 кВт. Була створена скінченно-елементна модель з відповідними граничними умовами та математичним описом процесу, яка була розв'язана чисельними методами в студентській версії програмного комплексу ANSYS-Fluent.

Аналіз отриманих результатів моделювання свідчить, що комп'ютерна модель чутлива до теплофізичних властивостей компонентів палива і кінетики реакції, але їх правильне завдання дозволяє достатньо точно оцінити аеродинамічну структуру потоку в пальнику і топці котла а також прогнозувати утворення забруднюючих речовин.

Показано, що зона високої інтенсивності доокиснення CO повністю співпадає з об'ємною зоною існування факелу, де температура димових газів досягає 800°C. Верифікація результатів комп'ютерного моделювання проведена шляхом порівняння розрахункового підігріву води у моделі «водяної сорочки» топкової камери і паспортних даних котла. Швидкість циркуляції води також повністю співпадає з паспортними даними і складає 1 м/с.

Результати дослідження можуть бути використані для підвищення ефективності процесу горіння при спалюванні біопалива та модернізації систем спалювання палива малопотужних котелень комунального та промислового теплопостачання, соціально-бюджетної сфери, індивідуально-побутового сектору тощо.

Ключові слова: пелети, горіння, пальник, побутовий котел, моделювання, завихреність, окисли азоту.

Постановка проблеми. Спалювання деревини як окремого палива є одним із найдавніших способів отримання теплової енергії. Проте в сучасній Україні, вирубка лісів задля опалення оселі протирічить етичним і екологічним нормам і є адміністративним злочином. Тому для опалення муніципальних і житлових приміщень

в ЄС застосовуються різноманітні відходи деревообробної та аграрної промисловості і в першу чергу – «пелети». На сучасному рівні розвитку енергетики, пелети є основним джерелом теплової енергії в Європі. Обсяги споживання пелет для приватних, муніципальних і промислових об'єктів постійно зростають [1] оскільки пелети є еколо-

гічно чистим видом палива, проте не є основним джерелом енергії.

При спалюванні пелет в атмосферу викидається стільки ж вуглекислого газу, скільки утворилося при природному розкладанні деревини [2]. Пелети мають стабільно високу якість, безпеку, екологічність, постійну насипну щільність, що дозволяє відносно легко транспортувати цей сипкий продукт на великі відстані і найголовніше – можливість автоматизувати управління процесом горіння. Стає очевидним, що пелети (паливні гранули) – єдиний вид палива, який може бути справжньою альтернативою природному газу в побутовому секторі [2].

В Україні використання біопалив на основі рослинної біомаси з кожним роком стає все більше перспективним з заміщення викопних палив [3]. Таким чином реалізуються на практиці заходи, щодо захисту навколишнього середовища за рахунок скорочення викидів парникових газів і пилу в атмосферу. По співвідношенню зручності та вартості опалення з паливними пелетами конкурує тільки природний газ, якщо будинок під'єднаний до центрального газопостачання. За відсутності центрального газопостачання – підключення до газорозподільної мережі – набагато дорожчий захід, ніж встановлення твердопаливного пелетного котла.

Для реалізації на ринку України пропонуються так звані «білі» пелети, що виготовлені з деревини твердих сортів, а також так звані «сірі» пелети, що виготовляються з деревини хвойних порід, рапу тощо пресуються у вигляді гранул. Оскільки пелетні котли розраховуються і проектується для спа-

лювання певного типу пелетів, то при переході на інші за складом та якістю види палива виникають питання в збереженні характеристик роботи котла. Одним із можливих інженерних шляхів визначення можливості заміни палив та зміни характеристик роботи енергетичного обладнання при цьому є комп'ютерне моделювання за допомогою загальноновизначених у світі програмних комплексів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз доступної літератури свідчить, що пелети є основним джерелом теплової енергії в ЄС при децентралізованому теплопостачанні. Пелети (пілети, деревні гранули) – це спресовані гранули, які складаються з відходів деревообробної та сільськогосподарської промисловості. Використання пелет у вигляді білопалива забезпечує 86% відновлюваного опалення та охолодження в ЄС (58,6% від загального споживання відновлюваної енергії) [4].

Загальне споживання біопалива в Україні у 2050 році може становити 23,1 млн. тон/рік. Близько 50% цих ресурсів буде використано для виробництва тепла та замінить природний газ (еквівалентно заміні 13,7 млрд м³/рік природного газу). Інша частина замінить вугільну та атомну генерацію на виробництво електроенергії, а також нафтопродукти на транспорті.

У період 2020–2050 рр. в Україні використання деревної біомаси залишиться на колишньому рівні, але зростає частка використання для виробництва енергії соломи, стебел, лушпиння соняшнику, сільськогосподарських відходів, енергетичних культур, рідкого біопалива, твердих відходів. Цей прогноз ґрунтується на розрахунках,

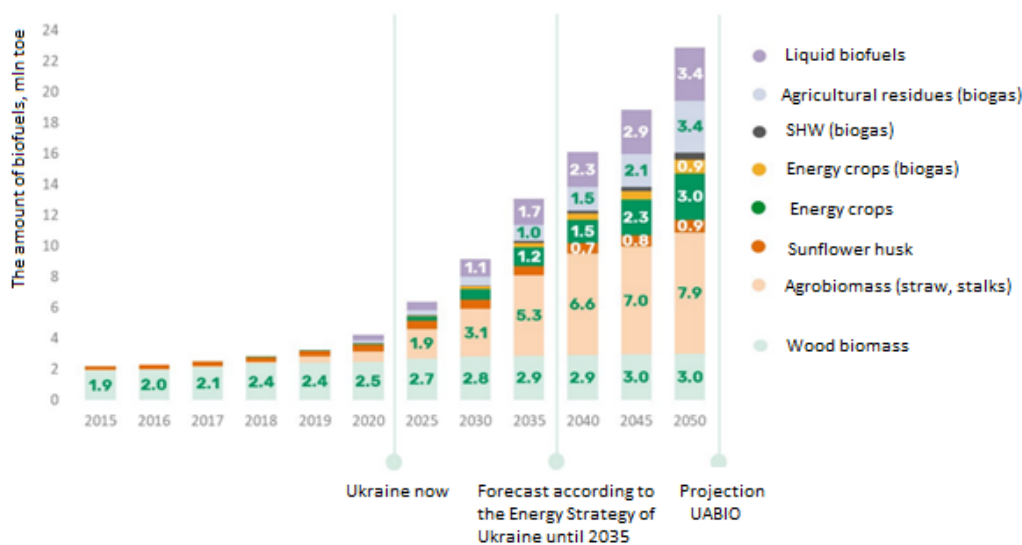


Рис. 1. Потенціал біопалива в Україні [4]

які показують, що потенціал деревної біомаси та соняшникових сіножатів в Україні у 2020 році вже використано більш ніж на 90% [5].

Враховуючи вищесказане, розробка рекомендації спалювання недеревної біомаси у побутових котлах з низьким рівнем викидів є важливою і актуальною задачею енергонезалежності країни. Розробка нової або вдосконалення існуючої системи горіння може бути прискорене за допомогою чисельних методів. Чисельні методи зазвичай використовуються для дослідження різних шляхів і заходів щодо зменшення викидів забруднюючих речовин від систем спалювання біомаси, особливо у великих або промислових котлах [6]. Чисельне моделювання часто є дієвим інструментом при аналізі процесу теплопередачі та розподілу температури димових газів, як показано в [7].

Зазвичай при моделюванні процесів горіння твердих палив розглядають процеси камерного спалювання для потужних енергетичних котлів [8, 9], а стосовно невеликих опалювальних котлів, зокрема які працюють на пелетах даних в літературі достатньо мало.

Відомою є робота корейських авторів [10] в якій авторами методами математичного моделювання та прямих досліджень оцінено характеристики роботи пелетного котла, в т.ч. і кінетики спалювання паливних пелетів, проте вказані результати отримано тільки для одного типу палива.

Існує думка, що спалювання агропелет не призводить до посилення парникового ефекту, про те це не так. Типові викиди твердих частинок при спалюванні сертифікованих та несертифікованих деревних пелет коливаються від 21,9 до 110 мг/м³ при 10% O₂ в сухих димових газах [11]. Крім більших викидів забруднюючих речовин, агропелети з високим вмістом золи та низькою температурою плавлення є ще однією проблемою. Так, в роботі [12] показано, що гранули з пшеничної соломи через високий вміст золи та низьку температуру плавлення золи непридатні для побутового застосування. Цей висновок узгоджується з дослідями авторів [13] щодо використання гранул, які складаються з чистої пшеничної соломи.

Отже, значна кількість публікацій в останні роки, свідчить про значний інтерес суспільства до тематики тому робота направлена на оцінку характеристик роботи котла та забезпечення необхідних параметрів його роботи при спалюванні агропелет є актуальною.

Мета дослідження. Основною метою даного дослідження є підготовка комп'ютерної моделі водогрійного котла VIADRUS A0C (Польського

виробництва), що буде використана для подальшої розробки, вдосконалення та впровадження пальників для спалювання пелет сільськогосподарського походження, а також визначення основних закономірностей процесу їх горіння й дослідження впливу режимних параметрів на розподіл температур в топковій камері, а також дослідження характеристик біоенергетичних трав'янистих та деревних культур як біопаливної сировини.

Методи, об'єкт та предмет дослідження. Метод дослідження – чисельний, за допомогою академічної ліцензії програмного комплексу ANSYS Student. Дана ліцензія є абсолютно безкоштовною (з 2015 року) і призначена для вирішення ознайомлювальних і освітніх задач в академічному середовищі.

Об'єкт дослідження – процеси, що протікають під час спалювання і так званих «білих» пелетів з деревини твердих сортів в комп'ютерній моделі топкової камери автоматичного котла на твердому паливі VIADRUS A0C.

Предмет дослідження – автоматичний котел на твердому паливі VIADRUS A0C потужністю 20 кВт, що призначений насамперед для опалення односімейних будинків, дач, невеликих майстерень тощо [14]. В якості палива в якому використовувались дерев'яні пелети, що подавались в факельний пальник розроблений компанією PellasX [15] з витратою 2 кг/с при швидкості нагнітаємого феном повітря 7,5 м/с з температурою 300°C. Для побудови моделі використані дані з відкритих джерел.

Виклад основного матеріалу дослідження. Дослідження виконувалось шляхом моделювання течії безперервної газової фази і її взаємодії з дискретною фазою частинок вугілля. З частинок вугілля при проходженні через газ виділятимуться газоподібні горючі речовини, які будуть джерелом для реакції горіння. Моделювати реакцію можна або з використанням моделі перенесення реагентів (species transport model), або з використанням моделі горіння без попереднього змішування (non-premixed combustion model).

В якості прикладу виконане моделювання процесів, що мають місце в топковій камері автоматичного котла на твердому паливі VIADRUS A0C потужністю 20 кВт. В якості палива в якому використовувались дерев'яні пелети, що подавались в факельний пальник з витратою 2 кг/с при швидкості нагнітаємого феном повітря 7,5 м/с з температурою 300°C.

Хімічний склад палива (дерев'янистих пелет, що є відходами деревообробної промисловості, так звані білі пелети) приведено в табл. 1 та табл. 2.

Таблиця 1

Склад сухої знезоленої маси

Proximate Analysis (Приблизний аналіз)	Wt % (DAF)
Volatiles (Летючі)	70
Char (C(s)) (Зв'язаний вуглець)	16,6
Ash (Зола)	4,4
Moisture (Вологість)	9,0

Таблиця 2

Хімічний склад сухої обеззоленої маси

Element	Wt, %	Mole Fraction
C	43,0	0,28284
H	6,0	0,4703
O	40,0	0,19752
N	7,0	0,03948
S	4,0	0,00986

Початкові дані, необхідні для виконання роботи, представлені в табл. 3.

Таблиця 3

Хімічний склад сухої обеззоленої маси

Параметр	Значення	Розмірність
Empirical secondary lower calorific value (Нижча теплота згоряння)	Визначається після перерахунку елементарного складу палива. Орієнтовно 17,8 МДж/кг	
Empirical secondary specific heat (Питома теплоємність продуктів згоряння)	1250	Дж/(кг·К)
Empirical secondary molecular weight (Молекулярна маса)	8,7	кг/кмоль
Coal as received HCV (Вища теплота згоряння)	16,79	МДж/кг
high temperature volatile yield (Вихід летючих при високих температурах)	1,0	–
fraction of N in char (DAF) (Вміст азоту у паливі)	0,5	–
Temperature (Температура займання палива)	+300	°C
Velocity magnitude (Середня швидкість повітря)	7,5...14	м/с
Total flow rate (Масова витрата палива)	2,6...4,3	кг/год

Для проведення моделювання роботи водогрійного котла створено геометричну модель та на її основі побудовано скінчено-елементна модель з граничними умовами і математичним описом розрахункового процесу, який реалізовано засобами ANSYS-Fluent. В якості прототипу вибраний автоматичний пелетний котел VIADRUS A0C для якого в відкритому доступі [14] є інформація щодо його конструктивних особливостей та технічних характеристик.

Головною частиною котла є чавунний секційний котельний корпус, виготовлений із сірого чавуну згідно з EN 1561 сорт 150. Котельний корпус зібраний з зпресованих одна з одною секцій і зафіксований за допомогою кріпильних болтів. Секції утворюють камеру згоряння та зольник, водний простір та конвекційну частину. Вхід та вихід опалювальної води розташовані у задній частині котла. Задня секція котла у верхній частині має горловину димоходу та фланець опалювальної води, у нижній частині – фланець живильної води з патрубком для випускного та випускного крана. До передньої секції прикріплені дверцята для чищення та зольника зі встановленим факельним пальником.

В котлі використовується встановлений на дверях зольника пальник для пелет від компанії PellasX [15].

З правого (лівого) боку котла розміщено бункер для пелет із листової сталі об'ємом 300 л. Бункер з'єднаний з пальником допомогою живильника палива та сполучного шлангу.

На рис. 1 та рис. 2 зображено компонування пелетного котла VIADRUS A0C, що приведена з метою формування у читача уявлення про конструкцію котла.

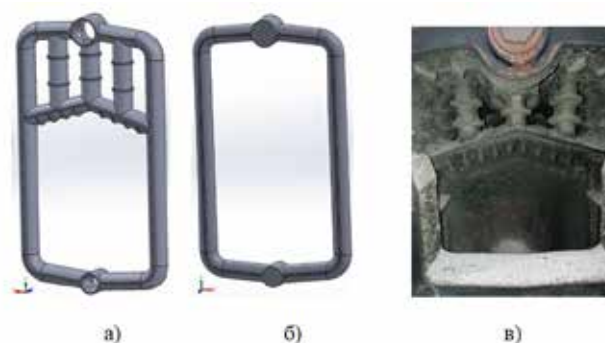


Рис. 1. Модель глибинної і першої секцій (а та б) та фотографія топкової камери діючого пелетного котла VIADRUS A0C (в)

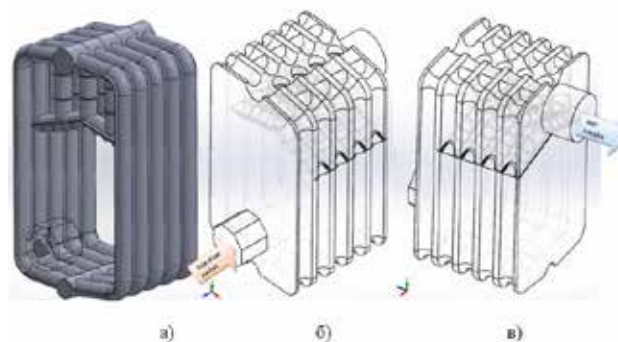


Рис. 2. Модель топкової камери пелетного котла VIADRUS A0C (а), фронтальний (б) і зворотній (в) види моделі топкової камери

Скінчено-елементна сітка моделі враховує розвиток примежового шару на всіх твердотільних поверхнях котельного агрегату. Область поза примежовим шаром моделювалась за допомогою нерівномірної тетраедричної сітки (рис. 3а). Після конвертації моделі в Fluent є можливість заощадити об'єм оперативної пам'яті комп'ютера при проведенні розрахунків шляхом об'єднання тетраедричних скінчених елементів в шестигранні. При цьому скошеність (Skewness) не перевищувала 0,8, а співвідношення сторін (AspectRatio) кінцевих елементів не перевищувало 40 (рис. 3б).

Комп'ютерна модель спалювання твердого палива в середовищі програмного комплексу ANSYS-Fluent містить рівняння нерозривності, осереднені по Рейнольдсу рівняння збереження енергії, імпульсу і маси (Нав'є-Стокса), а також рівняння переносу *i*-го компонента суміші. Для замикання осереднених по Рейнольдсу рівнянь Нав'є-Стокса використовувалась Realizable *k*- ϵ модель турбулентності, що забезпечує позитивність нормальних напруг ($\overline{(u_i')^2} \geq 0$) і виконання нерівності Шварца: $\overline{(u_i' u_j')} \leq (u_i')^2 \cdot (u_j')^2$. Транспортні рівняння для *k* та Realizable моделі турбулентності можна знайти в [16].

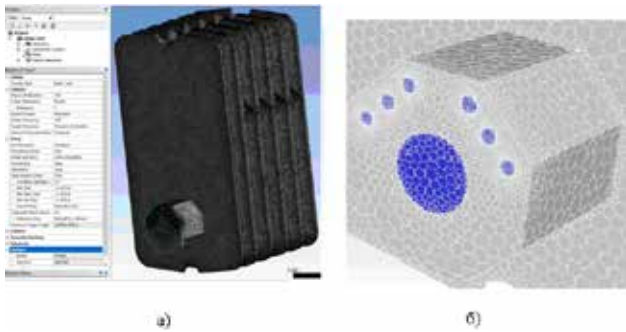


Рис. 3. Тетраедрична розрахункова сітка (а) та розрахункова сітка типу «Polyhedra» (б)

Для моделювання течії в примежовому шарі використані нерівноважні пристінні функції. Сильними сторонами яких є те, що вони призначені враховувати чутливість логарифмічного закону, який постулює розподіл швидкості потоку в примежовому шарі, до градієнта тиску. Тим самим вони краще прогнозують виникнення від'ємного градієнту тиску і появу зворотних течій чим стандартні пристінні функції.

Після завдання гідродинамічних характеристик потоку використана модель горіння без попереднього змішування (non-premixed combustion model). Відправною точкою для її використання є створення PDF таблиці (PDF – probability distribution function – функція розподілу вірогідності). Цей файл містить

інформацію про залежність змісту компонентів і температур від фракційного складу суміші і використовується ANSYS-Fluent для набуття цих значень в процесі розв'язку.

При визначенні PDF-таблиці використовувались рівняння Equilibrium Chemistry (Рівноважна хімія), які мають значно більшу точність. За допомогою цієї моделі є можливість включити ефекти проміжних реакцій і реакцій дисоціації, створюючи більш реалістичні прогнози температури полум'я, ніж загальноприйнята модель Eddy-Dissipation.

Обговорення отриманих результатів. Для аналізу результатів комп'ютерного моделювання використовувалась візуалізація полів температур взаємодії палива і окислювача, виходу летких сполук та ступені вигорання вуглецю у центральному перетині топкової камери для різних режимів навантаження котельного агрегату.

Поле температур у топковій камері приведено на рис. 4. Високотемпературна зона за результатами моделювання відповідає дійсній картині розвитку факелу і утворюється примусовим обдуванням підігрітого палива на спеціально обладнаній запальним тенем платформі пальника. Значні швидкості подачі окисника на деяких режимах сприяють безпосередньому контакту високоогрітих продуктів спалювання у факелі з фронтною стінкою топкової камери.

Аналіз рис. 4 свідчить, що температурне поле у розрізі топки достатньо рівномірне з верхньою межею біля 520°C за виключенням об'ємної зони існування факелу. На рисунку спостерігаються досить високі значення температур у зоні виходу продуктів спалювання з топки до димоходу (більше 300°C), проте такий розподіл температур є характерним для топкових камер котлів де спалюють пелети.

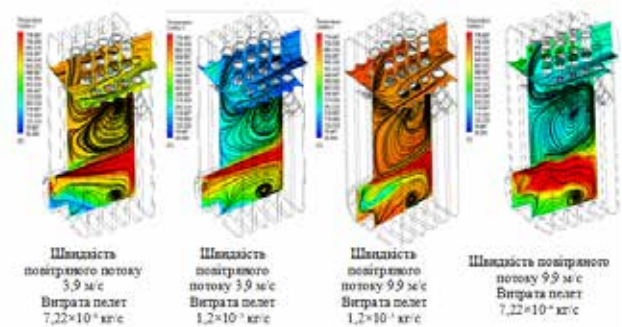


Рис. 4. Поле температур продуктів горіння деревних пелет

Використаний пакет прикладних програм обчислювальної гідродинаміки ANSYS-Fluent має досить широкі можливості стосовно розрахунку та візуаль-

ного представлення розрахункових параметрів. На рис. 5 приведений розподіл Mean Mixture Fraction, що показує межі, де вуглець і летючі переходять з твердої в газову фазу. Орієнтовно, приведені результати слід інтерпретувати як такі, що моделюють вихід твердих часток. Процес утворення незгорілих летючих твердих частинок є показовим при спалюванні твердих палив будь якого походження і потребує контролю при експлуатації твердопаливних котлів. Очевидно, що найбільш інтенсивний процес переходу до газової фази відбувається у пальнику і в області існування факелу, але при зміні режимів горіння процес реагування вуглецю уповільнюється, займаючи при цьому майже весь об'єм топки (рис. 5а, в).

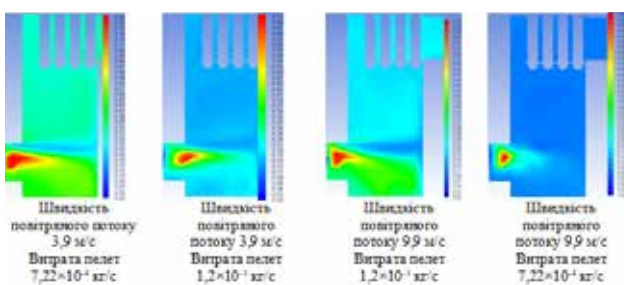


Рис. 5. Розподіл параметру Mean Mixture Fraction у центральному перерізі топкової камери

На рис. 6 і 7 відповідно представлені результати моделювання параметрів Evaporation/Devolatilization (DPM вихід летючих) та DPM Burnout (ступінь вигорання вуглецю).

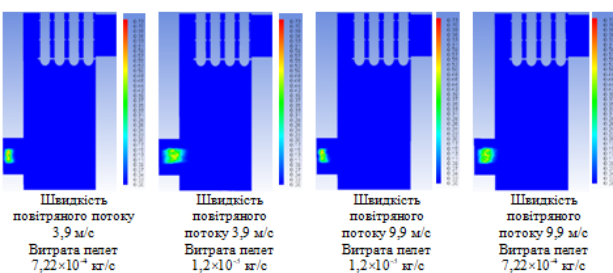


Рис. 6. Візуалізація виходу летких сполук у центральному перерізі топкової камери для різних режимів навантаження установки

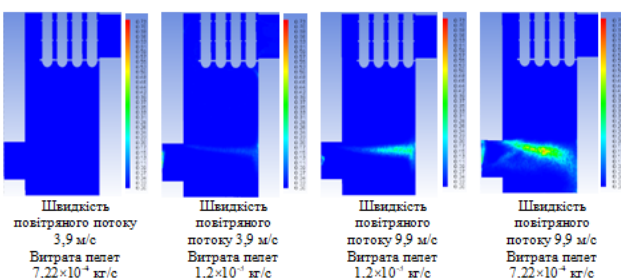


Рис. 7. Візуалізація ступеню вигорання вуглецю у центральному перерізі топкової камери для різних режимів навантаження установки

На рис. 8 представлені результати моделювання розподілу масової долі компонента CO.

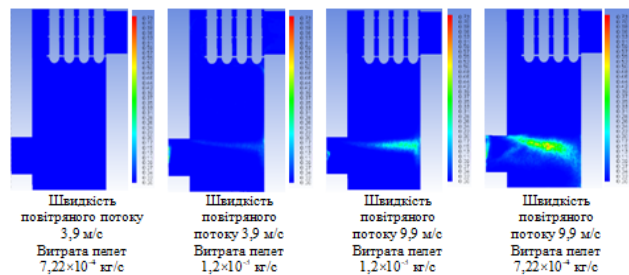


Рис. 8. Візуалізація розподілу масової долі компонента CO у центральному перерізі топкової камери для різних режимів навантаження установки

Так, на всіх представлених рисунках (рис. 5–8), для всіх розрахункових режимів видно, що існує розвинений факел реагуючих компонентів палива, який розповсюджується у горизонтальному положенні фактично відбиваючись від фронтальної стінки топки і заповнює продуктами горіння як нижню подову частину так і загальний об'єм топки. При цьому, як показують розрахунки, верхня частина топкової камери до теплообмінника має більш рівномірний температурний розподіл у порівнянні з подовою частиною, де на більшості режимів відбувається заходження факелу холодним повітрям і проходження реакції окиснення вуглецю сповільнюється (рис. 8). Найбільш інтенсивне згорання летких речовин у CO відбувається в полум'ї та у каналі пальника. Порівняння з температурними полями на рис. 4 вказує на відповідність зон високої інтенсивності доокиснення CO та зон з температурою >550°C. Однак, турбулентність є ще одним фактором, який визначає остаточну картину швидкостей проходження реакції горіння. Реакції CO з CO₂ ще мають високу інтенсивність на вході в першу частину конвективного теплообмінника у зв'язку з досить високою концентрацією CO, досить високі температури для спалювання CO і підвищений рівень турбулентності, що забезпечується обтіканням оребрених труб.

Результати також показують, що одна частина повітря для горіння, що виходить з пальника і тече під полум'ям, є надлишковою для процесів горіння утворюючи холодні зони, які можуть обмежувати швидкість реакцій горіння.

Розподіл наведених параметрів корелюється з гідродинамічною картиною потоку реагуючої суміші, що приведена на рис. 6. Як видно, топкова камера в об'ємі обмежена «водяною сорочкою». Зверху розташовується теплообмінник, конструк-

ція якого являє собою додаткову секцію гідравлічної системи котла, що складається з оребрених труб. Така секційна конструкція котла дозволяє набирати необхідну потужність, а збільшення площі теплообміну за рахунок теплообмінника підвищує ефективність утилізації теплоти відхідних газів. Отримані температурні градієнти показують, що температура теплоносія на виході становить 57°C , що відповідає робочому режиму опалювальної системи, а розрахунковий підігрів води у котлі не суперечить паспортним даним і не перевищує 15°C . Швидкість циркуляції обрана з огляду на паспортні характеристики і складає 1 м/с (рис. 9).

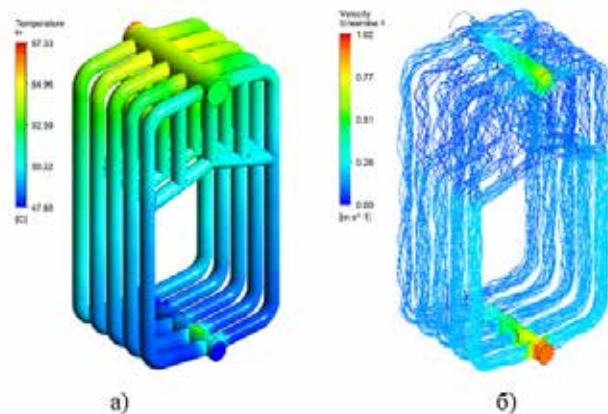


Рис. 9. Візуалізація поля температур (а) і швидкості (б) теплоносія, що рухається в «водяній сорочці» яка огортає топкову камеру котла

Висновки. На основі аналізу результатів комп'ютерного моделювання процесів спалювання пелет з твердих сортів деревини в топковій камері пелетного котла VIADRUS A0C за допомогою математичної моделі з використанням пакета прикладних програм ANSYS-Fluent визначено, що:

- модель дозволяє проводити досить точну оцінку аеродинамічної структури потоку в пальниках і топці котла, в яку даний пальник встановлено, а також емісійних характеристик викидів при спалюванні пелет у випадку коли точно задані теплофізичні властивості палива;
- зона високої інтенсивності доокиснення CO повністю співпадає з об'ємною зоною існування факелу, де температура димових газів досягає 800°C ;
- верифікація результатів комп'ютерного моделювання проведена шляхом порівняння розрахункового підігріву води у моделі «водяної сорочки» топкової камери і паспортних даних котла. Швидкість циркуляції води також повністю співпадає з паспортними даними і складає 1 м/с .

Результати дослідження в подальшому можуть бути використані для підвищення ефективності процесу горіння при спалюванні біопалива та модернізації паливоспалюючих систем котлів малої потужності комунальної та промислової теплоенергетики, соціально-бюджетної сфери, індивідуально-побутового сектора та ін.

Список літератури:

1. Паливні пелети. Характеристики і види. URL: <https://galmet.com.ua/yak-tse-pratsyuue/palyvni-pelety-harakterystyky-ta-vydy.html> . – 12.11.2021 р.
2. Все про пелети. URL: <http://liberator.com.ua/ua/vse-pro-peleti/>. – 12.11.2021 р.
3. ENplus. 2019. ENplus® Handbook (v3.0). URL: <https://enplus-pellets.eu/en-in/resources-en-in/technical-documentation-en-in.html#handbook> [Accessed: 2022-01-24].
4. Heletukha H.H., Zheliezna T.A., Drahnev S.V. Analysis of barriers to biomass energy production in Ukraine. Analytical note. BAU № 21. URL: <https://uabio.org/wp-content/uploads/2020/01/position-paper-uabio-21-ua.pdf>.
5. Bioenergy Association of Ukraine (2021). Available at: <https://uabio.org/bioenergy-transition-in-ukraine/>.
6. Zhou A, Xu H, Xu M, Yu W, Li Z, Yang W. Numerical investigation of biomass co-combustion with methane for NO_x reduction. Energy 2020:194.
7. Echi S, Bouabidi A, Driss Z, Abid M. CFD simulation and optimization of industrial boiler. Energy 2019; 169:105-14.
8. Nekhamin, M., Beztsennyi, I., Dunayevska, N. & Vyfatnuik, V. (2020). On using the ANSYS FLUENT software for calculating the process of burning a mixture of particles from different types of solid fuels. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4(8 (106)), 48–53. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.209762>.
9. Bhuiyan, A.A., Naser, J. (2015). CFD modelling of co-firing of biomass with coal under oxy-fuel combustion in a large scale power plant. Fuel, 159, 150–168. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2012.05.011>.
10. Lee, YW., Ryu, C., Lee, WJ. & Park YK. (2011). Assessment of wood pellet combustion in a domestic stove. The Journal of Material Cycles and Waste Management; 13 (3), <https://doi.org/10.1007/s10163-011-0014-0>.
11. Vicente E, Vicente A, Evtugina M, Tarelho L, Almeida S, Alves C. Emissions from residential combustion of certified and uncertified pellets. Renew Energy 2020; 161:1059-71.
12. Verma V, Bram S, Delattin F, Laha P, Vandendael I, Hubin A, et al. Agro-pellets for domestic heating boilers: standard laboratory and real life performance. Appl Energy 2012; 90(1):17-23.

13. Horvat I, Dovic D, Filipovi_c P. Laboratory testing of domestic hot water boiler while fired with different biomass pellets. In: 13th Conference on sustainable development of energy, water and environment systems. Palermo, Italy: SDEWES; 2018.
14. VIADRUS A0C Инструкци по Я обслуживанию и монтажу котла VIADRUS a.s. Vezručov 300 E-mail: info@viadrus.cz | www.viadrus.cz
15. Пелетный пальник PellasX HYBRID 35. [Электроний ресурс] – Режим доступа: <https://teplobezgaza.com.ua/pelletnaya-gorelka-pellasx-hybrid-35/>. – 12.11.2021 г.
16. FLUENT 5.5. User's Guide. – Fluent Inc. September 2000. – 563 p.

Baranyuk A.V., Vorobiov M.V., Kinzerskyi A. SIMULATION OF HEAT AND HYDRAULIC CHARACTERISTICS OF HOT-WATER BOILER FOR COMBUSTION OF FUEL PELLETS FROM HARDWOOD

The article deals with the processes of pellet combustion in a hot-water boiler in order to determine the thermal and hydraulic characteristics of the boiler depending on changes in the parameters of the combustion process. The parameters of the combustion process, namely the ratio of the supply of combustion components: fuel and oxidizing air, determine the completeness of fuel combustion and losses due to chemical and mechanical underburning. To organize complete combustion of fuel, especially for the operating conditions of specific equipment, it's necessary to deepen the understanding of the physical and chemical processes occurring during the combustion of pellets for a particular boiler unit. Using the CFD modeling method, the authors developed a computer model of a pellet burner for a 20 kW VIADRUS A0C solid fuel boiler. A finite-element model with appropriate boundary conditions and a mathematical description of the process was created, which was solved by numerical methods in the student version of the ANSYS-Fluent software package.

The analysis of the simulation results shows that the computer model is sensitive to the thermophysical properties of fuel components and reaction kinetics, but their correct setting allows for a fairly accurate assessment of the aerodynamic flow structure in the burner and boiler furnace and prediction of pollutant formation.

It is shown that the zone of high intensity of CO deoxidation completely coincides with the volumetric zone of the flame, where the temperature of the hot gases reaches 800 °C. The computer modeling results were verified by comparing the calculated water heating in the "water jacket" model of the combustion chamber with the boiler data sheet. The water circulation rate also fully coincides with the passport data and is 1 m/s.

The results of the study can be used to improve the efficiency of the combustion process when burning biofuels and to modernize fuel combustion systems of low-power boilers of municipal and industrial heat supply, social and budgetary sphere, individual household sector, etc.

Key words: pellets, combustion, burner, domestic boiler, modeling, vorticity, nitrogen oxides.

Босий М.В.

Центральнотраїнський національний технічний університет

СПРОЩЕНА ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ УТВОРЕННЯ ГАЗОГІДРАТІВ НА ПОВЕРХНІ РОЗДІЛУ ФАЗ «ГАЗ-ВОДА»

В більшості країн, серед яких Японія, Південна Корея, Індія, Китай, Австралія, США, Канада, Німеччина, Франція, Норвегія, а також в Україні зацікавлені в дослідженні газових гідратів для розвитку газогідратних технологій в більшості галузей промисловості. Актуальним нині є дослідження процесів утворення та плавлення газогідратів метану при стискуванні природного газу, особливо метану, в теплотехнологічних системах та установках. В статті запропонована спрощена фізико-математична модель, яка описує процес утворення газових гідратів на поверхні розділу фаз «газ+рідина». При дослідженні газогідратів відсутні більшість даних фізичних процесів утворення газогідрату метану при стискуванні природного газу, особливо метану, в теплотехнологічних системах та установках, в яких застосовується газогідратна технологія. Особливістю даної моделі є змінний розмір області, в якій досліджується процес утворення газогідрату метану на поверхні розділу фаз «газ+рідина». Вивчення процесу утворення газогідрату метану на поверхні розділу фаз «газ+рідина» з часом в ємності циліндричної форми і складає основну мету роботи. Аналітичні рішення цієї моделі при довільній області утворення газогідратів і різних температурних режимах на границі розділу фаз «газ+рідина» необхідно уточнити. А розробка спрощеної фізико-математичної моделі процесу утворення газогідрату метану є актуальною науковою проблемою. Запропонована модель, хоча із припущеннями, але достатньо добре описує процес утворення газогідрату метану на поверхні розділу фаз «газ+рідина» в ємності циліндричної форми. Наведені аналітичні рівняння для визначення товщини утвореного шару газогідратів і температурного поля в шарі та твердому тілі газогідратів. За допомогою математичного моделювання з використанням диференціального рівняння Фур'є та методом прогонки одержано розрахункові дані по товщині шару газогідратів метану в умовах фазоперехідних процесів на поверхні розділу фаз «газ+рідина» та розподіл температури в цьому шарі газогідратів.

Ключові слова: газогідрат метану, моделювання, процес гідратоутворення, гідратоутворююча суспензія, температура фазового перетворення, питома теплота утворення гідрату.

Постановка проблеми. Для розробки ефективних технологій видобування, транспортування та зберігання природних газів в газогідратному стані, а також для стискування та акумулювання природного газу для підвищення тиску газу в теплотехнологічних системах та установках необхідно створення наукових основ управління процесами утворення та дисоціації газогідратів. В першу чергу важливий механізм утворення газогідратів, що дозволяє розвивати і проектувати газогідратні технології та пропонувати нові методики дослідження фазовоперехідних процесів [1-6].

При моделюванні процесів тепломасопереносу, які супроводжуються зміною агрегатного стану середовища (наприклад, його гідратоутворення або дисоціація газогідратів) приходять до необхідності розв'язку задачі Стефана – утворення газогідратів «газ+рідина» в циліндричній ємності та дослідження температурного поля шару газогідратів [7-10].

В зв'язку з цим розробка спрощеної фізико-математичної моделі, яка описує процес утворення газових гідратів на поверхні розділу фаз «газ+рідина» і чисельного аналізу є актуальною науковою проблемою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Газові гідрати або клатрати – кристалічні сполуки, що утворюються при певних термодинамічних умовах з води і газу [1-5].

На рис. 1 наведено схематичне зображення молекулярної структури газогідрату. Розмір кристалів газогідрату в залежності від термодинамічних умов утворення і гідратоутворюючого агента, який застосовується, наприклад, природний газ, становить 50...150 мкм [2, 3].

В роботах [1-8, 10-15] описані властивості газових гідратів, основні умови і закономірності їх утворення і дисоціації, представлені механізми утворення газових гідратів і типи їх кристалізації. Велика увага приділяється методам вивчення,

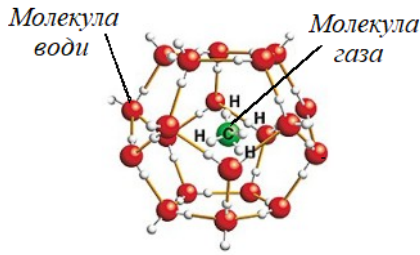


Рис. 1. Схематичне зображення структури газогідрату

як штучно отриманих, так і природних газових гідратів.

Газогідрати можуть утворюватись і стабільно існувати в широкому інтервалі тисків і температур (для метану від $2 \cdot 10^{-8}$ до $2 \cdot 10^3$ МПа при температурі від 70 до 350 К). Процес утворення газогідрату відбувається з виділенням теплоти, а його дисоціація з поглинанням теплоти. Теплота утворення газогідрату метану $(\text{CH}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O})_h$ складає 464 кДж/кг [15-21].

При чисельному аналізі фазових перетворень газогідратів є змінний розмір зони, в якій досліджується температурне поле і рухома границя розділу фаз. Фізичні властивості середовища при переході через границю фазових перетворень змінюються методом теплопровідності. Аналітичний розв'язок фізико-математичної моделі, тобто фазового переходу при утворенні газогідратів при довільній формі зони і різних температурних режимах на границі фаз невідомі. Існують деякі окремі розв'язки в одновимірній задачі температурного поля утворення газогідратів [22-24].

В статті розглядаємо спрощену фізико-математичну модель і чисельний аналіз температурного поля та фазових перетворень при утворенні газогідратів. Розв'язок моделі виконується наближеним методом на основі розв'язку диференціального рівняння Фур'є та методу прогонки з отриманням чисельних значень температурного поля і границі фазового переходу.

Постановка завдання. Метою статті є побудова спрощеної фізико-математичної моделі дослідження процесу утворення газогідрату метану на поверхні розділу фаз «газ+рідина» → гідрат і чисельного аналізу процесу гідратоутворення.

Виклад основного матеріалу дослідження. Пропонується аналітична модель утворення газових гідратів при умові, що гідратоутворювач в початковий момент часу розчиняється в рідині, а потім гідратоутворююча суміш при відповідних термодинамічних параметрах тиску та температури перетворюється в газогідрат.

Дослідимо фізико-математичну модель процесу утворення газогідрату метану на поверхні розділу фаз «газ+рідина» при охолодженні водо-гідратної суміші в циліндричній ємності.

Уявімо, що в початковий момент часу гідратоутворююча суміш заповнює деяку частину в циліндричній ємності $r > r_0$ при температурі і тиску суміші. У початковий момент часу $T = 0$ на поверхні розділу фаз «гідратоутворювач-рідина» встановлюється температура, яка відповідає температурі гідратоутворення T_h . При заданому режимі термодинамічних параметрів газогідрати утворюються при тиску охолодження, який перевищує тиск рівноваги і регулюється температурою рідини, та при виділенні теплоти фазового переходу $L_{ф.п.}$ яка відводиться холодоносієм. В деякий момент часу t радіус шару газогідратів, які утворюються в ємності циліндричної форми, дорівнює $r = \xi(t)$. При цьому на поверхні шару газогідратів має місце конвективний теплообмін. Тому в даній задачі шуканими функціями є товщина шару газогідратів $r = \xi(t)$ і температурне поле у ньому $T(r, t)$. Припустимо, що перенос теплоти в процесі гідратоутворення відбувається внаслідок теплопровідності.

Спрощену фізико-математичну модель процесу утворення газогідратів на поверхні розділу фаз «газ+рідина» → гідрат можна записати на основі диференціального рівняння теплопровідності, а умову на границі фазових переходів із умови балансу теплоти.

$$\frac{\partial T_1(r, t)}{\partial t} = a_1 \left(\frac{\partial^2 T_1(r, t)}{\partial r^2} \right), \quad 0 < r < \xi(t), t > 0; \quad (1)$$

$$\frac{\partial T_2(r, t)}{\partial t} = a_2 \left(\frac{\partial^2 T_2(r, t)}{\partial r^2} \right), \quad \xi(t) < r < R, t > 0; \quad (2)$$

$$\begin{cases} T(\xi(t), t) = T_{ф.п.} \\ \lambda_1 \frac{\partial T_1(\xi(t), t)}{\partial r} - \lambda_2 \frac{\partial T_2(\xi(t), t)}{\partial r} = \rho_1 L_{ф.п.} \frac{d\xi}{dt} \end{cases}, \quad (3)$$

де λ_1, λ_2 – коефіцієнти теплопровідності води та газогідрату, Вт/(м·К);

$T_{ф.п.}$ – температура фазового перетворення, К;

a_1, a_2 – коефіцієнти температуропровідності води та газогідрату, м²/с;

$L_{ф.п.}$ – питома теплота утворення газогідрату, Дж/кг;

$R(t)$ – радіус газогідрату метану, який змінюється з часом t ;

$\xi(t)$ – радіус фронту утворення газогідрату метану.

Для розв'язку крайової задачі (1)-(3) використовуємо метод кінцевих різниць. Координати рухомої границі фазового переходу визначаються методом уловлювання фронту у вузол просторової сітки. Для цього вводимо рівномірну просто-

рову сітку і нерівномірну часову сітку. Крок за часом вибирається так, щоб за цей часовий діапазон границя фазового переходу зміщувалась на один крок просторової сітки.

$$\begin{cases} x_j = (i-1) * h, i = 1...N \\ x_j = 0...x_n = R \\ h = \frac{R}{N-1} \end{cases}, \quad (4)$$

$$\begin{cases} t_{n+1} = t_n + \tau_{n+1}, n = 0, 1...M-1 \\ t_0 = 0...x_n = t_k \\ t_{n+1} \geq 0 \end{cases}, \quad (5)$$

де τ_{n+1} – крок за часом, $n = 0, 1...M-1$

В результаті апроксимації часних похідних з відповідними кінцевими різницями, отримаємо рівняння (6)-(9). Отримана система рівнянь розв'язується методом прогонки.

$$\begin{cases} \frac{T_{1,j}^{n+1} - T_{1,j}^n}{\tau_{n+1}} = a_1 \frac{T_{1,j}^{n+1} - T_{1,j}^n + T_{1,i-1}^{n+1}}{h^2}, i = 2...i^* - 1 \\ T_1|_{i=1} = T_n \\ T_1|_{i=i^*} = T_h \end{cases}, \quad (6)$$

де $i = i^*$ – границя фазового переходу

$$\begin{cases} \frac{T_{2,j}^{n+1} - T_{2,j}^n}{\tau_{n+1}} = a_2 \frac{T_{2,i+1}^{n+1} - T_{2,j}^{n+1} + T_{2,i-1}^{n+1}}{h^2}, i = i^* + 1...N - 1 \\ T_2|_{i=1} = T_h \\ T_2|_{i=N} = T_0 \end{cases}, \quad (7)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T_{1,i^*} - T_{1,i^*-1}}{h} - \lambda_2 \frac{\partial T_{2,i^*+1} - T_{2,i^*}}{h} = \rho_1 L_{\phi.n} \frac{h}{\tau_{n+1}}, \quad (8)$$

$$\tau_{n+1} = \frac{L_{\phi.n} \rho h^2}{\lambda_1 (T_h - T_{i^*-1}) - \lambda_2 (T_{i^*+1} - T_h)}. \quad (9)$$

Для розрахунку температурного поля в шарі газогідратів і часу, за який утворюються газогідрати (тобто товщини шару гідратів), теплофізичні властивості газогідрату метану взяті за даними [1-5]:

$\lambda_1 = 0,60$ – коефіцієнт теплопровідності води на поверхні розділу фаз, Вт/м·К;

$\rho_1 = 1000$ – густина води, кг/м³;

$\lambda_{2h} = 0,55$ – коефіцієнт теплопровідності газогідрату метану, Вт/м·К;

$\rho_{2h} = 910$ – густина газогідрату метану, кг/м³;

$L_{\phi.n} = 464$ – теплота утворення газогідрату метану, кДж/кг;

$\Delta T = 268$ – різниця між рівноважною температурою гідратоутворення і температурою водогідратної суміші, К;

$p = 75$ – тиск в системі, бар;

$R = 8,314$ – універсальна газова стала, кДж/моль·К.

$T_h = 288$ – температура утворення газогідрату метану, К;

$R = 120$ – розмір кристалогідратів метану, мкм;

$R(t)$ – радіус газогідрату метану, який змінюється з часом t ;

$\xi(t)$ – радіус фронту утворення газогідрату метану.

На рис. 2 наведено графік залежності $r = \xi(t)$ при утворенні газогідрату метану в циліндричній ємності.

На рис. 3 наведено результати розрахунку розподілу температури в гідратоутворюючому шарі та газогідрату метану на основі чисельного рішення.

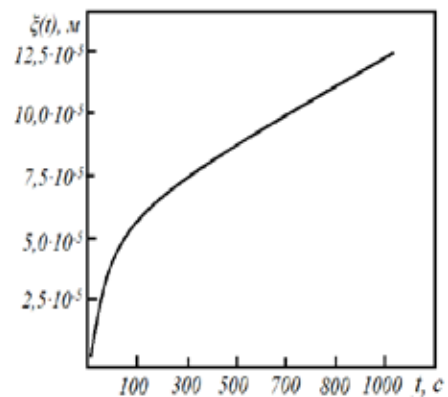


Рис. 2. Графік залежності $r = \xi(t)$ при утворенні шару газогідрату метану в циліндричній ємності

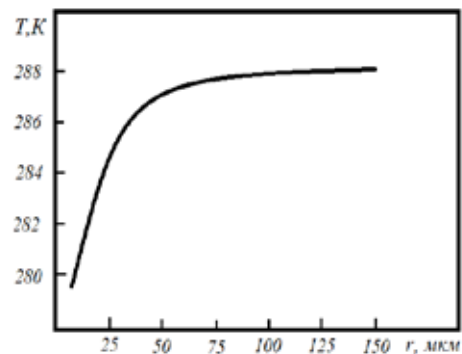


Рис. 3. Розподіл температури в гідратоутворюючому шарі та газогідрату метану на основі чисельного рішення при $T_h = 288$ К; $p_h = 7,5$ МПа

Перевірка адекватності моделі здійснювалась шляхом співставлення результатів розрахунку за рівняннями (6)-(9) з експериментальними даними: $T_h = 288,4$ К; $\tau = (1...20) \times 10^2$ с; $r = 15...130$ мкм, що дозволяє зробити висновок про узгодження розрахункових і експериментальних даних.

Модель утворення газогідрату метану коректно відображає фізичні процеси його утворення. Вона враховує зміну теплофізичних характеристик газогідрату метану, зміну розміру шару газогідратів

метану, теплообмінні процеси на границі утворення газогідрату метану та фазовоперехідні процеси.

Висновки

1. В даній роботі виконано моделювання процесу утворення газових гідратів на поверхні розділу фах «газ+рідина» з використанням методу прогонки. Приведені аналітичні рівняння для визначення товщини шару гідратів $r = \xi(t)$ і температурного поля в шарі гідратів. Аналіз результатів розрахунку за рівняннями (6)-(9) дає

можливість зробити висновок про узгодження розрахункових і експериментальних даних моделі.

2. Визначено розподіл температури в процесі утворення газогідратів. На підставі отриманих результатів можна стверджувати, що вони задовільно узгоджуються з експериментальними даними.

3. Дану методику моделювання процесу гідратоутворення можна використовувати для оцінки термодинамічних параметрів процесів утворення інших газових гідратів.

Список літератури:

1. Бык С.Ш., Макогон Ю.Ф., Фомина В.И. Газовые гидраты. М: Химия. 1980. 250 с.
2. Макогон Ю.Ф. Гидраты природных газов. М: Недра. 1974. 208 с.
3. Макогон Ю.Ф. Газовые гидраты, предупреждение их образования и использование. М: Недра. 1985. 232 с.
4. Макогон Ю.Ф. Газогидраты, история изучения и перспективы освоения. *Геология и полезные ископаемые Мирового океана*. 2010. № 2. С. 5–21.
5. Павленко А.М., Кутний Б.А., Абдуллах Н.М. Аналіз умов утворення і дисоціації газових гідратів. Вісник Приазовського державного технічного університету. Маріуполь, 2017. Вип. 34. С. 60–68.
6. Кутний Б.А. Розвиток теорії тепломасообмінних процесів при кристалізації та дисоціації газових гідратів: автореф. дис. докт. техн. наук: 05.14.06. Харків. 2021. 34 с.
7. Шостак Н.А. Моделирование образования и диссоциации гидратов при разработке и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений: автореф. дис. канд. техн. наук: 25.00.17. Краснодар. 2014. 23 с.
8. Englezos P., Kalogerakis N., Dholabhai., P.D., and Bishnoi P.R. Kinetics of formation of methane and ethane gas hydrates. *Chem Eng Sci*. Vol 42. No 11. 1987. P. 2647–2658.
9. Нефедов П.А., Джеджерова А.А., Истомин В.А., Долгаев С.И, Квон В.Г. Особенности кинетики гидратообразования метана в водных растворах электролитов. *Научно технический сборник. Вести газовой науки*. № 2 (18). 2014. С. 83–89.
10. Шиць Е.Ю., Корякина В.В., Иванова И.К., Семенов М.Е. Исследование кинетики и механизма роста гидратов природного газа в эмульсиях «вода в асфальтосмолопарафиновых отложениях» и «вода в нефти». *Химия в интересах устойчивого развития*. № 26. 2018. С. 298–304.
11. Манаков А.Ю., Пеньков Н.В., Родионова Т.В., Нестеров А.И., Фесенко Е.Е. Кинетика процессов образования и диссоциации газовых гидратов. *Russ.Chem. Rev. Успехи химии*. 2017. № 86 (9) С. 845–869.
12. Guo T.M. Kinetic of methane hydrate formation in pure water and inhibitor containing systems. *Chinese Journal of Chemical Engineering*. 2002. V. 10 (3). P. 490–497.
13. Бондаренко В.І., Витязь О.Ю., Зоценко М.Л. Газогідрати. Гідратоутворення та основи розробки газових гідратів. Монографія. Дніпропетровськ. Літограф. 2015. 219 с.
14. Педченко М.М. Гідратоутворення вуглеводневих газів. Монографія. Полтава: ПолтНТУ. 2014. 182 с.
15. Vysniauskas A., Bichnoi P.R. A Kinetic Study of Methane Hydrate Formatio. 1Y Canadian Permalrast Conference. Calgary. 1981. p. 299–304.
16. Vysniaukas A.A., Bichnoi P.R. Kinetic study of methane hydrate formation. *Chem. Eng. Sci*. 1983. Vol. 38. P. 1061–1072.
17. Босий М.В., Клименко В.В. Магопєць С.О., Гарасьова Н.Ю., Овчаренко А.О. Підвищення ефективності автомобільної газонаповнювальної компресорної станції шляхом застосування газогідратного акумулятора. *Refrigeration Engineering and Technology*. 2021. № 57(1). С. 45–54. <https://doi.org/10.15673/ret.v57i1.1978>.
18. Босий М.В., Клименко В.В. Транспортування природного газу в газогідратному стані. Розвиток транспорту. ОНМУ. 2022. С. 129–142.
19. Клименко В.В., Босий М.В., Парафійник В.П., Прилипко С.О. Газотурбінний привід з газогідратним дотискувачем паливного газу. Холодильна техніка та технологія. 2014. № 4 (150). С. 37–40.
20. Клименко В.В., Босий М.В., Аулін В.В., Філімоніхіна І.І., Лисенко С.В., Гриньків А.В. Енергоефективність заправки автомобільного транспорту стиснутим природним газом при використанні газогідратного акумулятора. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*, вип. 4 (35). 2021. С. 198–207. [http://mariea.kntu.kr.ua/pdf/4\(35\)/26.pdf](http://mariea.kntu.kr.ua/pdf/4(35)/26.pdf)
21. Клименко В.В., Босий М.В., Телюта Р.В. Патент на корисну модель Україна, № 151033 МПК F04B41/00, F25B1/00. Компресорна установка заправки стиснутим газом автомобільного транспорту. u202107813; заявл. 30.12.2021; опубл. 26.05.2022, бюл. № 21/2022.

22. Босий М.В., Клименко В.В., Телюта Р.В. Патент на корисну модель. Україна №151334 МПК F04B41/00 F25BJ1/00. Спосіб заправки стиснутим природним газом автомобільного транспорту. u202107814; заяв. 30.12.202; опубл. 07.07.2022, бюл. № 27/2022.

23. Босий М.В. Аналіз енерговитрат стискування природного газу в автомобільній газонаповнювальній компресорній станції з газогідратним акумулятором. *Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія «Механізація та автоматизація виробничих процесів»*, випуск 1 (47), 2022. С. 3–9.

24. Босий М.В. Спрощена модель дослідження температурного поля гідратоутворюючого шару газогідрату метану. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. Том 33 (72) № 5 2022. С. 204–209.

Bosyi M.V. A SIMPLIFIED PHYSICAL AND MATHEMATICAL MODEL OF RESEARCHING THE PROCESS OF GAS HYDRATE FORMATION ON THE SURFACE OF THE GAS-WATER PHASE INTERPRETATION

Most countries, including Japan, South Korea, India, China, Australia, the USA, Canada, Germany, France, Norway, as well as Ukraine, are interested in researching gas hydrates for the development of gas hydrate technologies in most industries. Currently, the study of the processes of formation and floating of methane gas hydrates during compression of natural gas, especially methane, in heat-technology systems and installations is relevant. The article proposes a simplified physico-mathematical model that describes the process of formation of gas hydrates at the interface of "gas+liquid" phases. In the study of gas hydrates, most of the data on the physical processes of the formation of methane gas hydrate during compression of natural gas, especially methane, in heat-technology systems and installations that use gas hydrate technology are missing. A feature of this model is the variable size of the area in which the process of formation of methane gas hydrate at the interface of the "gas+liquid" phases is investigated. Studying the process of formation of methane gas hydrate on the interface of "gas+liquid" phases over time in a cylindrical container is the main goal of the work. Analytical solutions of this model for an arbitrary region of gas hydrate formation and different temperature regimes at the boundary of the "gas+liquid" phases must be clarified. And the development of a simplified physico-mathematical model of the methane gas hydrate formation process is an urgent scientific problem. The proposed model, although with assumptions, describes quite well the process of formation of methane gas hydrate at the interface of "gas+liquid" phases in a cylindrical container. Analytical equations are given for determining the thickness of the formed layer of gas hydrates and the temperature field in the layer and solid body of gas hydrates. With the help of mathematical modeling using the Fourier differential equation and the running method, calculated data on the thickness of the layer of methane gas hydrates in the conditions of phase transition processes at the interface of the "gas + liquid" phases and the temperature distribution in this layer of gas hydrates were obtained.

Key words: methane gas hydrate, modeling, hydrate formation process, hydrate-forming suspension, phase transformation temperature, specific heat of hydrate formation.

УДК 614.841

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.2.1/44>**Семичаєвський С.В.**

Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

Самченко Т.В.

Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

ДОСЛІДЖЕННЯ СЦЕНАРІЇВ МОЖЛИВИХ ПОЖЕЖ В МАШИННИХ ЗАЛАХ АТОМНИХ І ТЕПЛОВИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

У цій публікації наведено актуальність питання забезпечення пожежної безпеки машинних залів атомних і теплових електростанцій. Вказано, що в машинних залах електростанцій України і за кордоном експлуатуються турбогенератори з водневим і воднево-водяним охолодженням різної потужності (від 25 до 1200 МВт) з надлишковим тиском водню в корпусі від 0,05 до 0,5 МПа. Акцентовано увагу на тому, що наявність в системах охолодження турбогенераторів горючого і вибухонебезпечного водню у поєднанні з горючим маслом, температура самозаймання якого значно нижче, ніж у водню, власне і складає проблему забезпечення вибухо- та пожежобезпеки в маїналах електростанцій.

Досліджено сценарії можливих пожеж в машинних залах атомних і теплових електростанцій, а саме: факельне горіння струменю масла, фонтануючого з напірного маслопроводу на відмітці обслуговування турбіни, горіння масла на майданчику обслуговування турбіни, що розлилося з системи змазування турбіни і ущільнення валу генератора. Зазначено, що вплив факельного горіння струменю масла, що виник при прориві напірного маслопроводу, на несучі конструкції перекриттів даху машинного залу атомних електростанцій приведе до втрати стійкості (деформації і обвалення) цих конструкцій упродовж короткого часу – до трьох хвилин.

Розрахунки показують, що лише за одну хвилину масло може розлитися на площі від 40 м² до 70 м². При більшій тривалості витоку буде покрита маслом вся площа обслуговування, і масло буде стікати донизу. Звідси випливає, що при проливі масла на площадці обслуговування турбоагрегату необхідно швидко реагувати (до однієї хвилини) на розущільнення маслосистеми, забезпечуючи відключення пошкодженого маслопроводу, щоб запобігти проливу масла і загоранню масла на площі більше 35 м², особливо поблизу колон будівельних конструкцій.

Крім того, проведено аналіз сценаріїв можливих пожеж в машинних залах атомних електростанцій, пов'язаних із витоком водню. Визначено часові характеристики розвитку аварійних ситуацій при розгерметизації генератору та витоку водню. Проведено аналіз небезпеки різних локалізацій витоків водню з урахуванням того, що до катастрофічних наслідків може привести накладання ряду негативних факторів.

Ключові слова: атомні і теплові електростанції, машинні зали, пожежна безпека, сценарії пожеж, турбогенератори.

Вступ. Машинні зали атомних і теплових електростанцій (далі – АЕС і ТЕС) представляють собою одноповерхові будівлі і мають загальні компоновальні рішення і за висотою розділяються на два приміщення [1, 2]. В верхньому приміщенні встановлюють турбоагрегати (турбіни і генератори), в нижньому – конденсаційному розміщують конденсатори, живильні, конденсатні, дренажні і інші насоси, регенеративні і мережеві підігрівачі, інше допоміжне обладнання. Під підлогою конденсаційного приміщення можливо улаштування підвалу глибиною 3-4 м, в якому розміщують насоси і трубопроводи охолоджуючої води, електричні кабелі і інші лінії комунікацій. Турбоагрегати в машинному залі компонуються по «острівному» принципу.

На АЕС використовуються турбоагрегати одноступінні з турбоагрегатами ТЕС і загальні принципи їх розміщення в об'ємі машзалів зберігаються.

В машинних залах електростанцій України і за кордоном експлуатуються турбогенератори (далі – ТГ) з водневим і воднево-водяним охолодженням різної потужності (від 25 до 1200 МВт) з надлишковим тиском водню в корпусі від 0,05 до 0,5 МПа.

Загальний вигляд машинного залу АЕС (ТЕС) зображено на рисунку 1.

Турбогенератори представляють собою синхронні генератори, основною функцією яких є конвертація механічної енергії парової чи газової турбіни в електричну при високих швидкостях обертання ротору (3000, 1500 об/хв). На рисунку 2 наведено схему турбогенератору, на рисунку 3 його загальний вигляд.



Рис. 1. Загальний вигляд машинного залу АЕС (ТЕС)

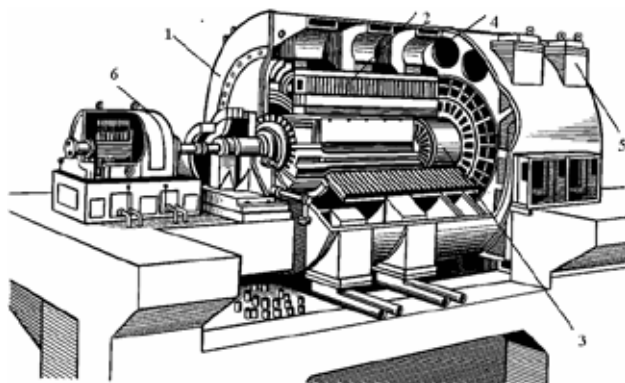


Рис. 2. Схема турбогенератору
 1 – Корпус; 2 – Сердечник статора; 3 – Ротор;
 4 – Секції водневого охолодження;
 5 – Газоохолоджувачі; 6 – Збуджувач

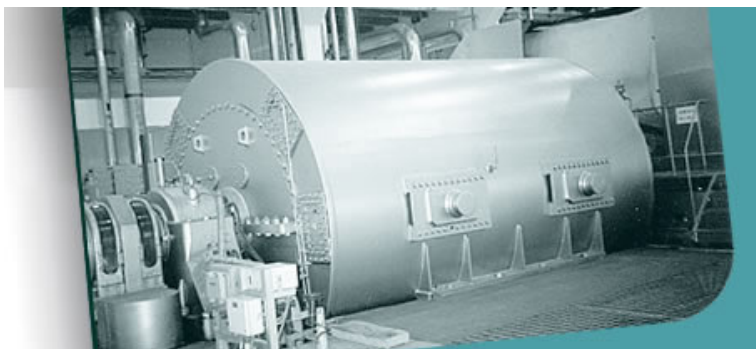


Рис. 3. Загальний вигляд турбогенератору

Водень знаходиться зсередини циліндричного зварного корпусу ТГ, закритого торцевими щитами [1, 2].

Для запобігання витоку водню у місцях виходу валу, що обертається, з торцевих щитів корпусу з обох сторін ТГ встановлені масляні ущільнення. «Запирання» водню в ущільненнях здійснюється зустрічним потоком турбінного масла в зазорі між вкладишем та валом. Тиск масла перевищує тиск водню, зазвичай перепад тисків масла і водню складає від 0,04 до 0,09 МПа, що і запобігає виходу водню через зазор між вкладишем і валом. Для підведення масла в ущільнення і зливання його передбачається система маслопостачання. Для заповнення ТГ воднем і підтримання заданого надлишкового тиску зсередини корпусу застосовується відповідне обладнання, що утворює газову систему ТГ. Комплекс – корпус ТГ, вузли ущільнень, обладнання газової системи і системи маслопостачання – складає газомасляну систему [1, 2].

Наявність в системах охолодження ТГ горючого і вибухонебезпечного водню у поєднанні з горючим маслом, температура самозаймання якого значно нижче, ніж у водню, власне і складає проблему забезпечення вибухо- та пожежобезпеки в машзалах електростанцій.

Слід відмітити, що існуючий комплекс заходів із забезпечення пожежної безпеки в машинних залах АЕС і ТЕС має низку недоліків [3]. Разом з тим, досвід експлуатації за останні десятиріччя показує, що на електростанціях, в тому числі і на атомних, трапляються великі аварії з катастрофічними наслідками – пожежами, значними пошкодженнями і (або) руйнуванням ТГ і будівельних конструкцій машинних залів внаслідок пошкодження ТГ і горіння водню і масла [3].

Враховуючи вищевикладене, набуває актуальності питання забезпечення пожежної безпеки машинних залів АЕС і ТЕС.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. В публікації [3] проаналізовано причини виникнення пожеж у машинних залах енергетичних підприємств України та за кордоном, досліджено недоліки наявних

систем пожежогасіння на цих об'єктах. Наведено конкретні випадки неспрацювань систем пожежогасіння в машинних залах на прикладах Вірменської АЕС (Вірменія) й АЕС Vandellos (Іспанія).

В той же час ця робота не містить досліджень сценаріїв можливих пожеж в машинних залах атомних і теплових електростанцій.

Мета та завдання дослідження. З метою сприяння у вирішенні зазначеної проблеми у цій публікації необхідно розглянути сценарії можливих пожеж в машинних залах атомних і теплових електростанцій, пов'язаних із горінням турбінного масла та водню. Результати дослідження вказаних сценаріїв сприятимуть розробленню відповідних заходів щодо запобігання виникнення пожеж в машинних залах електростанцій та пропозицій щодо вдосконалення існуючої системи їх протипожежного захисту.

Дослідження сценаріїв можливих пожеж в машинних залах АЕС і ТЕС

Є такі характерні варіанти аварійної ситуації з пожежою масла [4-7]:

- факельне горіння струменю масла, фонтануючого з напірного маслопроводу на відмітці обслуговування турбіни;

- горіння масла на майданчику обслуговування турбіни, що розлилося з системи змазування турбіни і ущільнення валу генератора.

Факельне горіння струменю масла, фонтануючого з напірного маслопроводу на відмітці обслуговування турбіни

Пожежі масла в машинних залах протікають дуже швидко, і аналіз інформації про фактичні аварії з пожежами в машинних залах не дозволяють оцінити часові характеристики розвитку пожежі і впливу його на несучі конструкції даху машинного залу з урахуванням різних факторів.

Тому доцільно провести аналіз сценаріїв для вищенаведених варіантів аварійної ситуації з пожежою масла на базі розрахункових, геометричних та теплофізичних параметрів. Розрахунки проведені для наступних вихідних даних:

- температура полум'я, що впливає на несучі конструкції машинної зали, - 1380 °К;

- критична температура, при якій незахищені металоконструкції втрачають стійкість, - 773 °К.

За методикою, викладеною в [4], визначені довжина та висота струменю фонтануючого масла при розриві маслопроводу для реальних умов в машинній залі. Прийнято, що діаметр отвору чисельно дорівнює діаметру маслопроводу.

За результатами розрахунків, отримано, що при прориві напірного маслопроводу вертикаль-

ний струмінь масла підійметься на висоту від 20 м до 24 м і практично досягне перекриттів даху. Довжина горизонтальних струменів при прориві маслопроводів складатиме від 11 м до 12,5 м, що перевищуватиме відстань від місця розташування маслопроводу до найближчої колони машинної зали (близько семи метрів для АЕС з ВВЕР-1000). Таким чином, як ферми перекриттів даху, так і колони машзалу, які виявилися в осередку пожежі, будуть знаходитися в факелі полум'я масла, що горить з температурою 1380 °К упродовж всього часу витoku струменю масла з пошкодженого маслопроводу. Мінімальний час витoku визначається часом роботи відповідної схеми захисту і відсічної арматури. Фактично цей час може збільшуватися невизначено за рахунок збоїв та відмов в роботі апаратури і арматури.

Далі сценарій розвитку аварійної ситуації визначається часом нагріву незахищених металоконструкцій фонтануючим струменем масла, що горить до критичної температури (773 °К). Втрату стійкості конструкції при критичній температурі можна вважати початком обвалення.

Результати розрахунків [4], показують, що елементи стропильних ферм приведеною товщиною 14 мм і 20 мм прогріються до критичної температури упродовж часу порядку 10 с. Елементи металоконструкції колон товщиною 16 мм на висоті максимального прогріву прогріваються до критичної температури на першій хвилині пожежі при розташуванні колони в центрі зони пожежі, а при розташуванні на відстані 4,5 м від центра площі горіння масла 100 м², елементи прогріваються до критичної температури на другій хвилині пожежі.

Таким чином, можна зробити висновок про те, що конструкції ферм і колон, навіть ті, що мають значну товщину, втратять стійкість на перших хвилинах пожежі, що викликана розривом маслопроводу і фонтануванням масла.

Результати досліджень, наведені в [4-9], показують, що високотурбулентний факел, що утворився при аварійному викиді і займанні масла із систем управління і змазування турбіни, «зрізає» ферму покриття через 3 хвилини.

Таким чином, вплив факельного горіння струменю масла, що виник при прориві напірного маслопроводу, на несучі конструкції перекриттів даху машинного залу АЕС приведе до втрати стійкості (деформації і обвалення) цих конструкцій упродовж короткого часу – до 3 хвилин.

Горіння масла, яке розлилося на площадці обслуговування з системи змазування і ущільнення генератора

В [4] приведені дані про час обвалення незахищених металевих конструкцій при пожежі, яка викликана горінням турбінного масла, що розлилося: від 4 хвилин до 6 хвилин для товщини конструкції від 10 мм до 20 мм.

Розрахунки за методикою, викладеною в [4-7], показали, що при горінні масла, яке розлилося, значний вплив на прогрів стропильних ферм, конструкцій дахового покриття і колон оказують такі фактори:

- приведена товщина металу;
- площа пожежі;
- висота дахового покриття над осередком пожежі;
- відстань конструкції від осі факелу полум'я.

Визначена залежність часу прогріву настилу покриття і елементів стропильних ферм до критичної температури в залежності від площі горіння турбінного масла. Стосовно до умов АЕС з ВВЕР-1000 критичне значення площі горіння турбінного масла дорівнює 35 м^2 – при меншій площі настил дахового покриття в районі осередку пожежі не зможе прогрітися до критичної температури.

Розрахунковий час прогріву металокопструкцій колон до критичної температури збільшується по мірі збільшення відстані колони від центру області пожежі і в залежності від площі пожежі. Можна вважати, що елементи металокопструкції колон не прогриваються до критичної температури, коли при площі горіння 50 м^2 відстань більше 6 м, а при 100 м^2 – більше 8 м. При менших відстанях і тих же площах горіння масла розрахунковий час прогріву металокопструкцій колон до критичної температури складає від трьох до десяти хвилин.

При розташуванні елементів металокопструкцій колон в осередку пожежі їх прогрів визначається тільки товщиною елемента. Так, при товщині конструкції 16 мм, вона прогривається до критичної температури упродовж часу від однієї до двох хвилин, а при товщині 30 мм – від двох до трьох хвилин.

Очевидно, що при заданому місці розташування колон і випадкової локалізації центру області пожежі відносно колон вирішальну роль для даної ситуації відіграє площа горіння масла, яку можна вважати рівною площі розливу масла.

Тому за методикою, даною в [4], виконані розрахункові оцінки можливої площі розливу масла при розриві маслопроводів на площадці обслуговування турбоагрегату для різних значень часу витоку масла і витрат масла (від 5 л/с до 10 л/с), які фактично мають місце.

Розрахунки показують, що лише за одну хвилину масло може розлитися на площі від 40 м^2 до 70 м^2 . При більшій тривалості витоку буде покрита маслом вся площадка обслуговування, і масло буде стікати донизу. Звідси випливає, що при проливі масла на площадці обслуговування турбоагрегату необхідно швидко реагувати (до однієї хвилини) на розущільнення маслосистеми, забезпечуючи відключення пошкодженого маслопроводу, щоб запобігти проливу масла і загоранню масла на площі більше 35 м^2 , особливо поблизу колон будівельних конструкцій.

Таким чином, для запобігання втрати стійкості металокопструкцій в машинній залі при проливі турбінного мастила на площадку обслуговування (і під нею) і займанні масла необхідно звести до мінімуму наступні параметри аварійної ситуації:

- тривалість витоку масла;
- площа розливу масла;
- тривалість горіння масла.

Аналіз сценаріїв можливих пожеж в машинних залах АЕС, пов'язаних з витокм водню

Аналіз сценаріїв аварійних ситуацій, пов'язаних з витокм і загоранням водню, проведений в [4-9] окремо, при цьому визначені часові характеристики, наведені в таблиці 1.

В [4] показано, що виникнення витоків водню із газомасляної системи генератора не повинно приводити до пожеж на АЕС при чіткій роботі системи сигналізації і своєчасним діям персоналу.

Але катастрофічна ситуація може виникати в результаті накладення ряду причин, кожна з яких окремо не могла б привести до такого фіналу. Тому наданий аналіз небезпеки різних локалізацій витоків водню з урахуванням того, що до катастрофічних наслідків може приводити накладення наступних несприятливих факторів:

- збої в роботі сигналізації і захисту;
- затримка (запізнення) прийняття заходів персоналом;
- порушення вимог технологічних інструкцій із обслуговування обладнання;
- невідповідність проектних рішень.

Так, відмова поплавкового клапану гідрозатвору ЗГ-500, хоча і не вимагає негайного зупинення генератора для усунення дефекту, але при наявності вказаних несприятливих факторів може привести не тільки до пропуску водню в зливний маслопровід, але і до більш тяжких наслідків у вигляді пожежі в машинній залі. Проведені в [4] розрахунки показали, що при прориві водню через гідрозатвор ЗГ-500 буде наступна мінімальна тривалість повного виходу водню з генератора:

Таблиця 1

Часові характеристики розвитку аварійних ситуацій при розгерметизації генератора

Аварійна ситуація	Час від виявлення витoku до початку розвантаження блоку, хв.		Час від виявлення витoku до відключення генератора, хв.	
	мінімально	максимально	мінімально	максимально
Виток водню зі швидкістю менше 1 МПа /год	10	11,5 год	36	15,5 год
Виток водню зі швидкістю 1 МПа/год і більше	1	4	2	7
Виток водню із загорянням	1	-	2*	4*

*Подача азоту в корпус генератора починається практично одночасно з відключенням генератору

Таблиця 2

Мінімальна тривалість повного виходу водню з генератора

Час виходу водню, хв.	Тип турбогенератору
25	ТВВ-1000-4У3
24	ТВВ-1000-2-У3
18	ТВВ-500-2-У3
7	ТВВ-220-2-У3

Аналогічно порушення маслостачання ущільнень валу генератора також не є критичною подією з точки зору пожежної безпеки, оскільки є швидкодіюче резервування подачі масла. Але збої в роботі системи сигналізації і захисту, помилкові дії і зволікання персоналу, дефекти деталей вузла можуть привести до значного пропускання водню через ущільнення. Можливі і більш тяжкі наслідки – розвиток аварійної ситуації з пожежою в машинному залі.

У звіті [4] виконані розрахункові оцінки умов для «залпового» викиду водню, розуміючи під «залповим» викид всієї кількості водню за час, що не перевищує однієї хвилини. Такому викиду відповідає значна площа вихідного отвору – від 300 до 450 см². Таку площу може мати кільцева щілина, яка утворюється при розкритті торцевого щита турбогенератора типу ТВВ-1000-4-У3, що могло би стати наслідком осевого удару зі сторони ротору генератора при зламі валу.

Отримана приблизна розрахункова оцінка мінімального вибухового тиску при прориві водню в зливний маслопровід $\Delta P=460$ кПа за методикою, викладеною в [10].

Ця величина вибухового тиску дасть «хлопок» воднево-повітряної суміші з вихлопом назовні розпиленого масла і наступними можливими наслідками:

– займання масла з воднем;

– порушення з'єднання напірного маслопроводу з підшипником, що приведе до фонтанування масла, що горить;

– порушення кріплення кришок підшипників, якщо міцність болтів кріплення виявилась недостатньою; зміщення кришок приведе до зростання вібрації і биття валу, що може стати причиною поломки валу;

– потрапляння водню в головний маслобак, оскільки вибуховий тиск перевищує можливості захисного гідрозатвору перед маслобаком.

В [4] надані порівняльні кількісні оцінки тепловидалення від згоряння водню і тепловидалення при згорянні масла стосовно до генераторів типу ТВВ-1000-4У3 і ТВВ-1000-2-У3 для «залпового» викиду водню і фонтанування масла. В першу хвилину виділиться сумарно від згоряння водню і масла від $15,72 \cdot 10^6$ до $16,2 \cdot 10^6$ кДж, що прискорить прогрівання і обвалення конструкцій покрівлі. В наступні хвилини виділення тепла різко знизиться до $7,56 \cdot 10^6$ кДж в хвилину, - тобто тільки від згоряння масла.

Висновки

1. Встановлено, що основну проблему вибухота пожежонебезпеки в машинних залах АЕС і ТЕС створює наявність в системах охолодження турбогенераторів горючого вибухонебезпечного водню у поєднанні з горючим маслом, температура самозаймання якого значно нижче, ніж у водню.

2. Досліджено сценарії можливих пожеж в машинних залах АЕС і ТЕС. Виявлені такі характерні варіанти аварійної ситуації з пожежою масла:

– факельне горіння струменю масла, фонтануючого з напірного маслопроводу на відмітці обслуговування турбіни;

– горіння на площадці обслуговування масла, що розлилося з системи змазування турбіни і ущільнення валу генератора.

3. Встановлено, що вплив факельного горіння струменю масла, що виник при прориві напірного маслопроводу, на несучі конструкції перекриттів даху машинного залу АЕС приведе до втрати стійкості (деформації і обвалення) цих конструкцій упродовж короткого часу – до трьох хвилин.

4. Результати аналізу горіння на площадці обслуговування масла, що розлилося з системи змазування турбіни і ущільнення валу генератора показали, що лише за одну хвилину масло може розлитися на площі від 40 м² до 70 м². При більшій тривалості витoku буде покрита маслом вся площадка обслуговування, і масло буде стікати донизу. При проливі масла на площадці обслуговування турбоагрегату необхідно швидко реагувати (до однієї хвилини) на розущільнення маслосистеми, забезпечуючи відключення пошкодженого маслопроводу, щоб запобігти проливу масла і загоранню масла на площі більше 35 м², особливо поблизу колон будівельних конструкцій.

5. Для запобігання втрати стійкості металоконструкцій в машинній залі при проливі турбінного

мастила на площадку обслуговування (і під нею) і займанні масла необхідно звести до мінімуму наступні параметри аварійної ситуації:

- тривалість витoku масла;
- площа розливу масла;
- тривалість горіння масла.

6. Визначено часові характеристики розвитку аварійних ситуацій при розгерметизації генератору та витoku водню.

7. Проведено аналіз небезпеки різних локалізацій витokів водню з урахуванням того, що до катастрофічних наслідків може привести накладання ряду негативних факторів.

8. Проблема забезпечення пожежної безпеки машинних залів енергетичних підприємств на теперішній час залишається актуальною та потребує проведення подальших досліджень. Всі отримані результати аналізу сценаріїв аварійних ситуацій на турбоагрегатах, пов'язаних з проливанням масла, витokом і загоранням водню, повинні бути покладені в основу розробки заходів із попередження і обмеження наслідків пожеж в машинних залах АЕС та ТЕС.

Список літератури:

1. Хмельницькая АЭС. Энергоблок № 2. Модернизация. Главный корпус. Турбинное отделение. Мероприятие 29112. Разработать и реализовать систему по сигналу «пожар» сброса водорода из корпуса генератора за пределы машзала. Этап 1. Технические предложения / КИЭП. 2007.
2. Технические предложения по повышению пожарной безопасности машзплов АЭС и устойчивости их строительных конструкций при пожаре / КИЭП-ТППБ. 1993.
3. Семичаевський, С.В., Щодо пожежної небезпеки машинних залів енергетичних підприємств / С.В. Семичаевський., І.Г. Стилик, В.В. Свірський, Б.О. Алімов // Вчені записки таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. – 2021. – Том 32 (71) № 6. – С. 145-150.
4. Солдатов Г.Е., Голоднова О.С. О путях снижения риска пожаров в машинных залах АЭС // Атомкон. – 2009. – № 2 (3). – С. 42–46.
5. International Guidelines for Fire Protection of Nuclear Power Plants. Published on behalf of NUCLEAR POOL'S FORUM. Revised Edition 1997. AMERICAN NUCLEAR INSURERS Town Center, Suite 300S, 29 South Main Street West Hartford, Connecticut 06107-2430 U.S.A.
6. Regulatory Guide 1.189 Fire Protection for Operating Nuclear Power Plants NRC Information Notice 2002-27: Recent Fires at Commercial Nuclear Power Plants in the United States.
7. Nuclear Insurance Fire Risk Edgar Dressler (American Nuclear Insurers), ICONE 9, Nice, France, 2001.
8. V.F. Niolette, S.P. Nowlen, Fire models for assessment of nuclear power plant fires, Nuclear Engineering and Design 125 (1991) 389-394.
9. Mardyros Kazarians, George Apostolakis, On the fire hazard in nuclear power plants, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM 87185, USA, Nuclear Engineering and Design 47 (1978), 157-168.
10. Микеев А.К. Противопожарная защита АЭС. М., Энергоатомиздат, 1990.

Semychayevsky S.V., Samchenko T.V. STUDY OF POSSIBLE FIRE SCENARIOS IN MACHINE ROOMS OF NUCLEAR AND THERMAL POWER PLANTS

This publication presents the relevance of the issue of ensuring fire safety in engine rooms of nuclear and thermal power plants. It is indicated that turbine generators with hydrogen and hydrogen-water cooling of various capacities (from 25 to 1200 MW) with excess hydrogen pressure in the housing from 0.05 to 0.5 MPa are operated in the engine rooms of power plants in Ukraine and abroad. Attention is drawn to the fact that the presence of flammable and explosive hydrogen in the cooling systems of turbine generators in combination with flammable oil, the auto-ignition temperature of which is significantly lower than that of hydrogen, actually constitutes a problem of ensuring explosion and fire safety in power plant halls.

The scenarios of possible fires in the engine rooms of nuclear and thermal power plants were investigated, namely: flaring of a jet of oil gushing from the pressure oil pipeline at the turbine maintenance mark, burning of oil at the turbine maintenance site that spilled from the turbine lubrication system and generator shaft sealing. It is noted that the impact of the flaring burning of the oil jet, which occurred during the rupture of the pressure oil pipeline, on the load-bearing structures of the roofs of the engine room of nuclear power plants will lead to the loss of stability (deformation and collapse) of these structures in a short time - up to three minutes.

Calculations show that in just one minute oil can spill over an area of 40 m² to 70 m². With a longer duration of leakage, the entire service area will be covered with oil, and the oil will flow downwards. It follows from this that in case of an oil spill on the site of maintenance of the turbine unit, it is necessary to respond quickly (up to one minute) to depressurize the oil system, ensuring the disconnection of the damaged oil pipeline, in order to prevent oil spillage and oil ignition on an area of more than 35 m², especially near the columns of building structures.

In addition, an analysis of scenarios of possible fires in engine rooms of nuclear power plants related to hydrogen leakage will be conducted. The time characteristics of the development of emergency situations during depressurization of the generator and hydrogen leakage are determined. An analysis of the danger of various localizations of hydrogen leaks was carried out, taking into account the fact that the combination of a number of negative factors can lead to catastrophic consequences.

Key words: *engine rooms, fire safety, fire scenarios, nuclear and thermal power plants, turbine generators.*

Сінчук І.О.

Криворізький національний університет

Котякова М.Г.

Криворізький національний університет

КОНТРОЛЬ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В АСПЕКТІ ВПРОВАДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ MICRO GRID

Стаття присвячена питанням застосовується централізованої структури генерації та розподілу електричної енергії в умовах сьогодення. У статті визначено, як альтернативу традиційним джерелам енергії, та розглядаються особливості підключення відновлювальні джерела енергії. Визначено, що інтеграція відновлювальних джерел до існуючих мереж породжує проблеми з якістю електричної енергії, а також споживання енергії по кожній шині, розташування та миттєві значення потужності відновлювальних джерел електричної енергії є випадковими та складно прогнозованим. Через цю невизначеність показники якості електричної енергії значно знижуються. У статті анонсовано, що на сьогоднішній день актуальними залишаються питання якості електричної енергії, з метою збільшення можливостей використання відновлювальних джерел енергії в аспекті впровадження технології Micro Grid. Акцентовано увагу на те, що за таких можливих варіантів підключення джерел розосередженої генерації до електричної мережі підприємства, та зважаючи на стохастичний характер функціонування відновлювальних джерел енергії, на потужностях яких мають вони базуватися слід приділити увагу аспектам якості електричної енергії, як локального показника, а не загального показника в мережі підприємства. У статті, зважаючи на всі зазначені аспекти, умови та чинники, запропоновано схему системи контролю та управління рівнем якості електричної енергії та алгоритм її функціонування. Між тим, у статті доведено можливість впровадження технології PLC для передавання інформації у аспекті інтелектуалізації систем управління електропостачанням та впровадження технологій Micro Grid, насамперед враховуючи можливість адаптивного управління якістю електричної енергії у мережі централізовано-децентралізованим способом. Стаття присвячена аспектам застосування технології PLC для передавання інформації у Micro Grid підприємств, питанням впровадження адаптивного управління якістю електричної енергії у мережі цих підприємств централізовано-децентралізованим способом, з метою підтримання належного рівня показників якості електричної енергії в мережі. Запропоновано в подальшому, при формуванні підходів до інтелектуалізації систем управління електропостачанням враховувати можливість застосування технології PLC для передавання інформації у Micro Grid.

Ключові слова: *якість електричної енергії, відновлювані джерела енергії, розосереджена генерація, Micro Grid, технологія PLC.*

Постановка проблеми. У світовій практиці в умовах сьогодення застосовується централізована структура генерації та розподілу електричної енергії. Слід зазначити, що традиційні джерела енергії мають кінцевий запас, який найближчим часом може бути виснаженим. Як альтернатива традиційним джерелам енергії розглядаються відновлювальні джерела енергії [1].

Проте, інтеграція відновлювальних джерел до існуючих мереж породжує проблеми з якістю електричної енергії. Типова розподільча мережа має стохастичний характер. Споживання енергії по кожній шині, а також розташування та миттєві значення потужності відновлювальних джерел електричної енергії є випадковими та складно

прогнозованим. Через цю невизначеність показники якості електричної енергії можуть значно знижуватися [2].

Зважаючи на вище сказане, актуальними залишаються питання якості електричної енергії та дослідження можливих шляхів їх вирішення з метою збільшення можливостей використання відновлювальних джерел енергії в аспекті впровадження технології Micro Grid.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У ряді публікацій приділено чимало уваги питанням впровадження джерел розосередженої генерації до систем електропостачання підприємств та впровадження технології Micro Grid. Однак, залишається не вирішеним питання передачі інфор-

мації на великі відстані при впровадженні Micro Grid та особливо при встановленні на підприємствах додаткових електрогенеруючих потужностей на базі відновлюваних джерел електричної енергії, з метою оптимального управління та диспетчеризації [1-13].

Постановка завдання. Таким чином, актуальною є наукова задача – синтез підходів і методів щодо побудови системи управління засобами підвищення якості електричної енергії в мережах з розподіленою генерацією з метою їх адаптації до впровадження сучасних інтелектуальних енергетичних систем в аспекті впровадження технології Micro Grid.

Виклад основного матеріалу дослідження. Розосереджена генерація на базі відновлюваних джерел електричної енергії виробляє електроенергію з ряду джерел електричної енергії різних типів та встановленої потужності. Проте, при інтеграції таких джерел до мережі виникає низка технічних та економічних проблем. Передусім, технічні проблеми можуть виникати у аспектах якості електричної енергії. Тому системи з розподіленою генерацією повинні задовольняти ряду технічних вимог для забезпечення ефективного, надійного та безпечного функціонування загальної мережі електропостачання [3].

Бурхливий розвиток силової електроніки та цифрових систем керування дозволяє розробляти пристрої, які забезпечать активне керування енергетичними характеристиками джерел розподіленої генерації з метою покращення роботи системи електропостачання шляхом поліпшення показників якості електроенергії в точці спільного підключення навантажень.

Між тим, слід зауважити, що показники якості електричної енергії мають нормування, та у разі відхилень призводять до негативних явищ, що характеризуються великим матеріальним збитком та порушенням технологічного процесу [4].

З поміж іншого, до складу систем комутації в системах електропостачання входять силові напівпровідникові ключі, що генерують гармонічні складові струмів у точці спільного підключення навантажень, тобто є нелінійним навантаженням з точки зору мережі, тобто погіршує показники якості електричної енергії [5].

Слід зазначити той факт, що незважаючи на те, що до показників якості електричної енергії відноситься велика кількість показників, проте найчастіше його відносять до якості живлячої напруги, оскільки в традиційних електроенергетичних системах у якості джерел живлення висту-

пають джерела напруги, а форми струмів визначаються характеристиками навантаження. Низька якість електричної енергії може бути відображена у вигляді різних показників, таких як коливання амплітуди та частоти, перехідні процеси, вміст гармонік у формі сигналів, коефіцієнт потужності, несиметрія фаз, неперервність потужності і т.д. Оскільки електроенергетична система є взаємопов'язаною, то зниження показників якості в одній точці мережі може призводити до зниження показників якості в інших частинах мережі [6].

Стохастичний характер зміни режиму роботи генеруючих потужностей відновлювальних джерел електричної енергії мають вплив при під'єднанні джерел розосередженої генерації на їх базі до мережі.

Між тим, на сьогоднішній день важливим і пріоритетним питанням стала модернізація та інтелектуалізація систем електропостачання. Ця тенденція особливо важлива для в тому числі і для підприємств. Одним із факторів розвитку систем електропостачання стало впровадження до їх складу джерел розосередженої генерації на базі відновлюваних джерел електричної енергії. Такі мікромережі можуть працювати ізольовано від централізованого електропостачання або підключатися до нього. При цьому слід зауважити той факт, що джерелами гармонік в таких мережах є не лише інвертори джерел розподіленої генерації, а й інші навантаження мережі гірничого підприємства. Значна кількість споживачів електричної енергії можуть розглядатися як нелінійні навантаження, оскільки містять в своєму складі напівпровідникові перетворювачі, що призводять до створення гармонічних струмів навіть при живленні від чисто синусоїдальної напруги. Поведінка гармонічних складових в мережах та навантаженнях є різною в залежності від порядку гармоніки, тобто співвідношення частоти конкретної складової до частоти основної гармоніки [7].

Однією з таких технологій, що сприяє розвитку інтелектуальних мереж, в тому числі а в аспекті розвитку концепції Smart Grid є технологія PLC для передавання інформації у MicroGrid та базі X10. Особливістю цієї технології є передача даних по силовим лініях електромережі. Силова мережа служить спільним середовищем передачі даних, тобто в один момент часу передачу даних здійснює одразу декілька приладів та електричної енергії. Для вирішення конфліктів трафіку застосовуються регулюючі механізми організації протоколу доступу до мережі [8].

Технологію PLC у системі MicroGrid можна використовувати для автоматичного збору даних з лічильників електричної енергії, що дає можливість здійснювати аналіз, обробку та прогнозування даних щодо електроспоживання. У той же час, PLC-модулі є елементами зв'язку пристроїв промислової електроніки в єдиній інформаційній інфраструктурі [9].

Таким чином, враховуючи важливість впровадження до енергетичної галузі принципів декарбонізації та інтелектуалізації, актуальним науковим завданням є побудова принципів системи управління контролем рівня якості електричної енергії у мережі, яка має бути побудована за принципом адаптивності.

Одним із аспектів інтеграції джерел розосередженої генерації є під'єднання їх до мережі. У низьковольтних мережах з розподіленою генерацією досить часто є необхідним забезпечення четвертого (нейтрального) провідника засобами джерел енергії та відповідних мережевих інтерфейсів для живлення однофазних та несиметричних трифазних навантажень. При цьому слід очікувати зменшення взаємовпливу фаз навантаження між собою у контексті забезпечення відповідності показникам якості електричної енергії, проте дане питання вимагає відповідного аналізу [9].

Між тим, існують різні варіанти під'єднання джерел розосередженої генерації до мережі, які суттєво відрізняються впливом на потоки потужності і, відповідно, на втрати потужності і електроенергії в мережі. Так, джерела розосередженої генерації можуть бути приєднані до шин підстанції. В цьому випадку трансформатор розвантажуються на потужність, яка виробляється джерелами розосередженої генерації, і в результаті зменшуються навантажувальні втрати в трансформаторі. В лініях електропередачі втрати не змінюються. Якщо, ж розглянути варіант під'єднання джерел розосередженої генерації безпосередньо біля споживача електричної енергії, то розвантажуються як трансформатор підстанції, так і частина мережі, що забезпечує додаткове зменшення втрат потужності. Оскільки зменшується потік потужності, то зменшуються також втрати напруги, що сприяє покращенню рівнів напруги на шинах підстанцій.

Однак, за таких можливих варіантів підключення джерел розосередженої генерації до електричної мережі підприємства, та зважаючи на стохастичний характер функціонування від-

новлювальних джерел енергії, на потужностях яких мають вони базуватися слід приділити увагу аспектам якості електричної енергії, як локального показника, а не загального показника в мережі підприємства [10].

Таким чином, зважаючи на всі зазначені аспекти, умови та чинники запропоновано схему системи контролю та управління рівнем якості електричної енергії (рис. 1) та алгоритм її функціонування (рис. 2).

На рисунку 1 зображена запропонована схема системи контролю та управління рівнем якості електричної енергії, де В1-п – вимірювальні блоки відповідних показників якості електричної енергії в на ділянках мережі М1-п, що регулюються відповідними пристроями П1-п.

На рисунку 2 зображено алгоритм системи корегування показників якості електричної енергії вказаної на рисунку 1. Запропонований алгоритм дає можливість корегування відповідних показників якості електричної енергії централізовано-децентралізованим способом управління на відповідних ділянках мережі з підключенням розосереджених джерел електричної енергії на базі відновлювальних джерел енергії.

Враховуючи можливість адаптивного управління якістю електричної енергії у мережі централізовано-децентралізованим способом, є можливим впровадження технології PLC для передавання інформації у аспекті інтелектуалізації систем управління електропостачанням та впровадження технологій Micro Grid.

Зважаючи на актуальність інтелектуалізації систем управління електропостачанням є можливим впровадження технології PLC для передавання інформації у Micro Grid, що позбавить труднощів з передачею управляючого сигналу та передачі даних до системи управління [2].

Висновки. 1. Враховуючи актуальність та необхідність застосування технології PLC для передавання інформації у Micro Grid підприємств є необхідність впровадження адаптивного управління якістю електричної енергії у мережі цих підприємств централізовано-децентралізованим способом, з метою підтримання належного рівня показників якості електричної енергії в мережі.

2. Запропоновано в подальшому, при формуванні підходів до інтелектуалізації систем управління електропостачанням враховувати можливість застосування технології PLC для передавання інформації у Micro Grid.

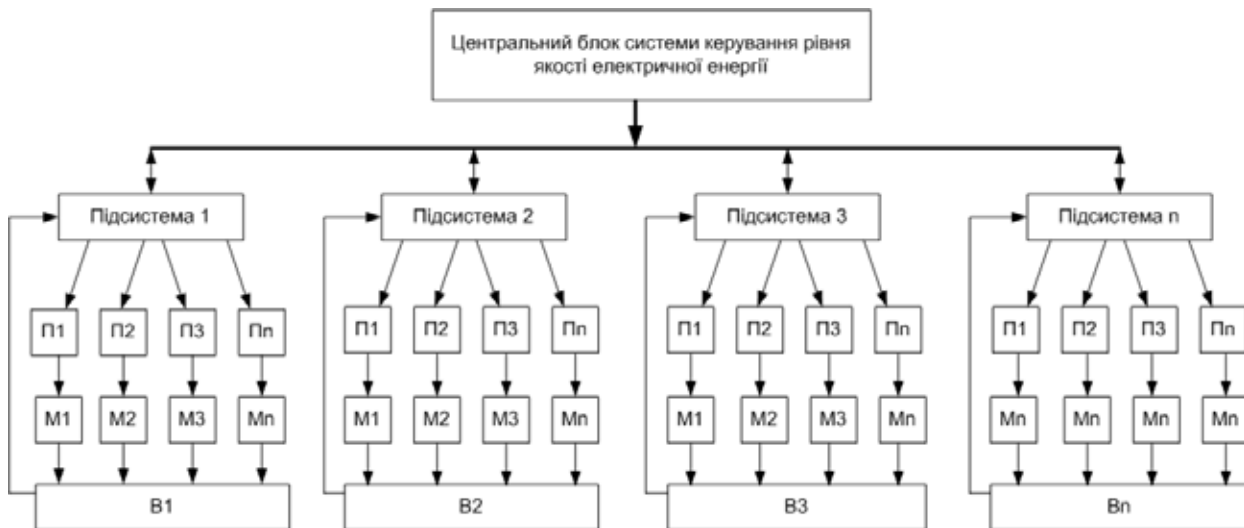


Рис. 1. Схема системи контролю та управління рівнем якості електричної енергії

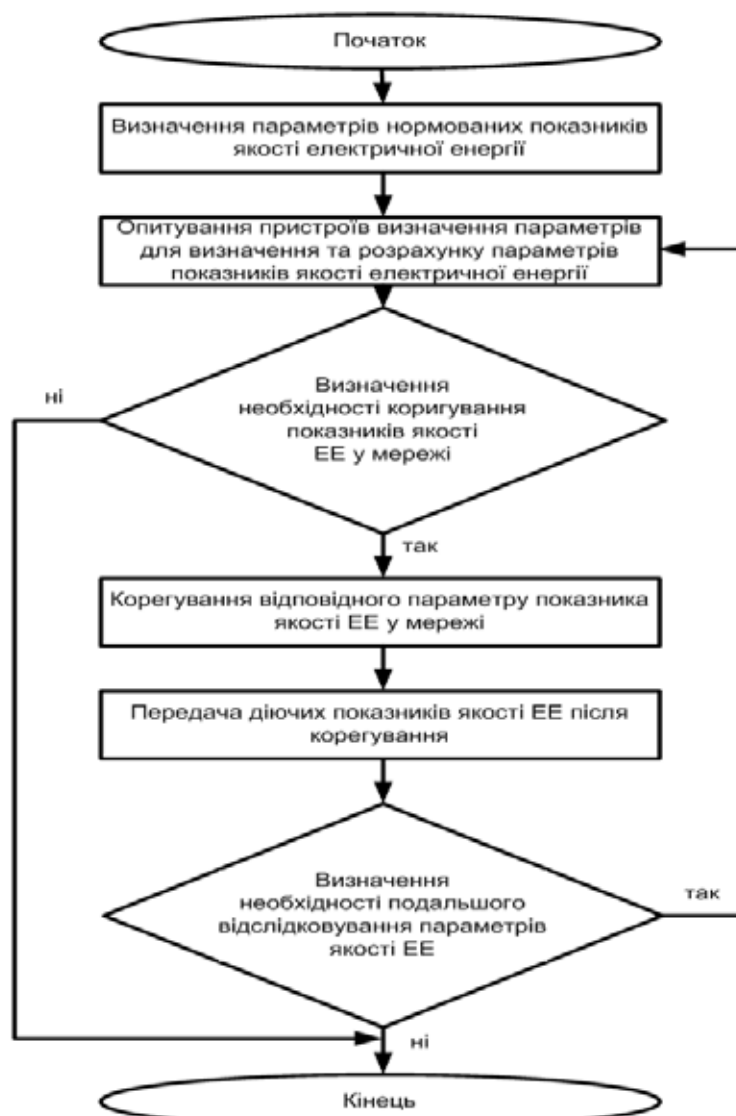


Рис. 2. Алгоритм системи корегування показників якості електричної енергії

Список літератури:

1. Лежнюк П.Д., Комар В.О., та Кулик В.В., Вплив відновлюваних джерел енергії на функціонування розподільних електричних мереж. *Енергетика та електрифікація*, № 1, с. 8 - 12, 2015.
2. Лежнюк П.Д. та Буславець О.А. "Застосування Smart Grid технологій для балансування режимів в локальних електричних системах", *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства. Серія «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України»*, №195, с. 3-6, 2018.
3. P. Lezhniuk, O. Rubanenko, V. Komar, and O. Sikorska. The Sensitivity of the Model of the Process Making the Optimal Decision for Electric Power Systems in Relative Units. in *Proc. of the IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, 2020, pp. 247-252.
4. P. Lezhniuk, V. Komar, O. Rubanenko, and N. Ostra. The sensitivity of the process of optimal decisions making in electrical networks with renewable energy sources, *Przeglad Elektrotechniczny*, no.10, 2020, pp. 32-38.
5. Wang X., Zhang Y., Zhang S., Li X. and Wu L. Equilibrium Analysis of Electricity Markets With Microgrids Based on Distributed Algorithm. *IEEE Access*, vol. 7. 2019. pp. 119823-119834.
6. Циганенко Б. В., Сумський Д. М., Кирик В. В., та Кацадзе Т. Л., "Підвищення енергоефективності розподільних мереж з використанням SMART-технологій", *Electronics and communications*. Т. 21, № 4, 2016, с. 58-64.
7. Интеллектуальні електричні мережі: елементи та режими: За заг. ред. акад. НАН України О.В. Кирилленка / *Інститут електродинаміки НАН України. К.: Ін-т електродинаміки НАН України*, 2016. 400 с.
8. Буткевич А.Ф., Зелинский Е.С. Интеллектуализация систем диспетчерского управления территориально-распределенными электроэнергетическими объектами – основные задачи и их решение // *Технічна електродинаміка. Тематичний випуск „Силова електроніка та енергоефективність”*. Ч.3. 2001. С.76-81.
9. Колотов М.В. Передача інформації по лініях електроживлення. *Енергоінформ. Укреноергозбереження*. 2003. №42(224). С. 5-6.
10. J. Misurec, P. Mlynek and S. Bezzateev, "The modeling of power line for PLC in smart grids," *Progress In Electromagnetics Research Symposium - Spring (PIERS)*, St. Petersburg, 2017, pp. 780-786.
11. European Smart Grids Technology Platform: vision and Strategy for Europe's Electricity Networks of the Future. European Commission. 2006. 44 p.
12. Ягуп В.Г., Ягуп Е.В. Определение режима компенсации реактивной мощности в четырехпроводной трехфазной системе электроснабжения с помощью поисковой оптимизации. *Технічна електродинаміка*. 2016. № 1. С. 60–66.
13. Coh H.H., Liao L., Zhang D., Dai W., Lim C.S. Denoising Transient Power Quality Using an Improved Adaptive Wavelet Threshold Method Based on Energy Optimization. *Energies*. 2022. No 15. Pp. 1-21.

Sinchuk I.O., Kotyakova M.G. ELECTRICITY QUALITY CONTROL IN THE ASPECT OF IMPLEMENTATION OF MICRO GRID TECHNOLOGY

The article is devoted to the issues of the application of the centralized structure of generation and distribution of electric energy in today's conditions. The article defines renewable energy sources as an alternative to traditional energy sources and considers the features of connecting them. It has been determined that the integration of renewable sources into existing networks creates problems with the quality of electrical energy, as well as the energy consumption per bus, the location and instantaneous power values of renewable sources of electrical energy are random and difficult to predict. Due to this uncertainty, the indicators of the quality of electrical energy are significantly reduced. The article announced that the issue of the quality of electrical energy remains relevant today, with the aim of increasing the possibilities of using renewable energy sources in the aspect of implementing Micro Grid technology. Attention is focused on the fact that under such possible options for connecting sources of distributed generation to the electric network of the enterprise, and taking into account the stochastic nature of the functioning of renewable energy sources, on the capacities of which they should be based, attention should be paid to aspects of the quality of electric energy, as a local indicator, and not a general one indicator in the enterprise network. In the article, taking into account all the mentioned aspects, conditions and factors, the scheme of the system of control and management of the level of the quality of electric energy and the algorithm of its operation is proposed. Meanwhile, the article proves the possibility of implementing PLC technology for information transfer in the aspect of intellectualization of power supply management systems and the introduction of Micro Grid technologies, primarily taking into account the possibility of adaptive management of the quality of electrical energy in the network in a centralized-decentralized way. The article is devoted to the aspects of the application of PLC technology for the transmission of information in the Micro Grid of enterprises, to the issue of the implementation of adaptive management of the quality of electric energy in the network of these enterprises in a centralized-decentralized way, in order to maintain the appropriate level of indicators of the quality of electric energy in the network. It is suggested that in the future, when forming approaches to the intellectualization of power supply management systems, the possibility of using PLC technology to transmit information in the Micro Grid should be taken into account.

Key words: power quality, renewable energy sources, distributed generation, Micro Grid, PLC technology.

УДК 662.6

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.2.1/46>**Шахбазов І.О.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Сірий О.А.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ БІОПАЛИВА В ПОБУТОВИХ КОТЕЛЬНИХ УСТАНОВКАХ

На сучасному етапі розвитку промисловості, за існуючих техногенних навантажень на навколишнє середовище, є важливим гармонійний розвиток економіки, енергетики й екології. Для цього необхідно запроваджувати нові технології на основі альтернативних і відновлювальних джерел енергії (ВДЕ), а також запроваджувати заходи щодо зменшення викидів шкідливих речовин у навколишнє середовище. У світі діють декілька програмних документів, у тому числі державні стратегії, які покликані для протидії надмірного утворення забруднюючих речовин та стимулюють популяризацію ВДЕ в енергетичних секторах, зокрема альтернативного палива з біомаси. Незважаючи на те, що виробництво біомаси та перетворення її на паливо пильно перевіряється через зміни землекористування, як добре керований відновлювальний ресурс, біомаса може зробити суттєвий внесок для розвитку сталої економіки. В даній роботі представлено огляд іноземної літератури щодо використання альтернативних палив. Проведено широкий аналіз досягнень у цій галузі та з'ясовано, що більшість вчених, які зосереджені на дослідженні синтетичних газів, пропонують додавання горючих газів різного складу у продукти газифікації для енергетичних цілей. За результатами огляду наукових робіт з'ясовано, що приділяється чимала увага характеристикам горіння деревних й агропелет, біомасел та синтез-газу, а також питанням емісії шкідливих оксидів у продуктах спалювання. На основі представлених робіт, які охоплюють експериментальні дослідження і математичне моделювання згорання палива, визначено перспективні напрями використання альтернативного палива з біомаси. Крім того, розглянуто розробки CFD-моделей горіння палива в топкових камерах, створення яких потребує спеціалізованих програм, що є сучасним підходом у дослідженні будь-яких палив.

Ключові слова: камера спалювання, біопаливо, пелети, біодизель, синтез-газ, оксиди азоту, оксиди вуглецю.

Постановка проблеми. Стрімке зростання населення, промисловий та економічний розвиток стають основними причинами споживання енергії у всьому світі. Проте викопним паливом (вугілля, нафта і природний газ) завдано чималі збитки навколишньому середовищу: забруднення довкілля, глобальне потепління, кислотні дощі та руйнування озонового шару, що є основною причиною погіршення якості повітря внаслідок викидів забруднювачів повітря, серед яких пил, сполуки сірки, оксиди азоту (NO_x) і вуглецю (CO_2). Через надмірне утворення викидів при використанні викопних джерел, необхідно переходити до відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), серед яких особливе місце займає біомаса.

Для протидії процесу глобального потепління в Енергетичній стратегії України на період до 2035 року [1] важлива роль відводиться віднов-

люваним джерелам енергії, серед яких згадується біомаса і стверджується, що «зростатиме частка сектору електроенергетичної галузі, який використовує тверду біомасу та біогаз як енергоресурс, що зумовлюватиметься як відносною сталістю виробництва (за наявності ресурсної бази), так і тенденцією до формування локальних генеруючих потужностей».

Перша Директива ЄС щодо відновлюваної енергії стимулювала дослідження на біопаливо, що дозволяє застосовувати його у різних галузях промисловості. Директива 2018/2001 [2] встановила ціль – частка енергії з ВДЕ у валовому кінцевому енергоспоживанні щонайменше 32% до 2030 року з метою скорочення викидів CO_2 та виконання Паризької угоди [3].

На основі Паризького протоколу головною метою є зниження рівня глобальних викидів на

80% до 2050 року та обмеження підвищення температури Землі в порівнянні з доіндустріальним періодом. На вимогу Паризької угоди протокольним рішенням засідання Кабінету Міністрів України схвалено та направлено до Секретаріату ООН «Стратегію низьковуглецевого розвитку України до 2050 року» [4], яка передбачає перехід на траєкторію низьковуглецевого зростання, зменшення обсягу викидів парникових газів, відмову від викопного палива і старт інвестування у ВДЕ.

Біопаливо вважається відновлюваною та чистішою альтернативою використанню викопного палива через менший вуглецевий слід, а також знижує залежність від зовнішніх енергоресурсів, і, таким чином, воно є життєво важливим компонентом зусиль з декарбонізації енерговитратних секторів та енергонезалежності держави.

Постановка завдання. Головне завдання – визначити найбільш перспективні напрями використання біопалива в Україні, у тому числі біопалива аграрного походження для забезпечення потреб муніципальної енергетики та приватних домогосподарств, шляхом аналізу проблематики використання різних альтернативних палив у котлоагрегатах невеликої потужності та огляду останніх досягнень в області спалювання біопалива, що охоплює літературу експериментальних досліджень і комп'ютерного моделювання.

Виклад основного матеріалу дослідження. Основним матеріалом дослідження є аналіз останніх досліджень і публікацій у сфері спалювання альтернативних палив з твердої, рідкої та газоподібної біомаси у побутових котлоагрегатах для подальшого порівняння та відокремлення перспективних застосувань. Біомаса відноситься до ВДЕ і вважається вугленейтральним джерелом, тобто кількість вуглецю, що надходить до атмосфери внаслідок спалювання, дорівнює кількості вуглецю, що забирається з землі чи ґрунту для утворення цієї біомаси.

Тверде біопаливо. Біопаливо сільськогосподарського походження, наприклад пелети, являють собою тверде паливо у вигляді гранул. У статті [5] представлено дослідження щодо покращення спалювання деревних та агропелет у побутових водогрійних котлах. Авторами запропоновано нову концепцію системи згоряння біомаси, що складається з ротаційного пальника та двох типів інтенсифікаторів процесу горіння, з метою простого застосування в більшості існуючих котлів, підвищення ефективності системи, а також зниження викидів для дотримання відповідних вимог Стандартів ЄС. Результати показують, що

при впровадженні інтенсифікатора горіння значно скорочуються викиди незгорілих забруднюючих речовин (СО зменшується на 40% у разі деревних гранул та на 30% – у випадку агропелет), викиди твердих частинок складають 28-56 мг/м³ (при 10% O₂ в сухих димових газах) та покращується ефективність згоряння (збільшується на 2,6-3,7%).

Оптимальні геометричні і технологічні параметри, які призводять до меншого утворення забруднюючих речовин і вищої теплової ефективності, можна знайти за допомогою методу CFD моделювання. Навіть спрощені обчислювальні методи моделювання складних явищ, які відбуваються в котлі на біомасі, можуть бути дуже корисними, якщо вони пропонують надійні та достатньо точні прогнози.

Попередньо розроблена і підтверджена методологія моделювання горіння за допомогою обчислювальної гідродинаміки для великомасштабних котлів була модифікована та реалізована для комерційного водогрійного котла на деревних пелетах потужністю 32 кВт [6]. Виконується моделювання процесу горіння палива для налаштування відповідного обладнання (рис. 1). Перетворення твердого палива моделюється за допомогою пов'язаної емпіричної одновимірної моделі шару, яка передбачає склад суміші горючих газів, що виділяється з шару палива в надшаровий простір. Порівняно з початково запропонованою моделлю конверсії паливного шару, модифікована модель включає часткове обуглювання та окислення летючих речовин і покладається на температуру газу, виміряну над паливним шаром. Використовуючи модифіковану модель перетворення паливного шару, було змодельовано кілька випадків [6], щоб знайти найбільш відповідні параметри комбінованої моделі горіння з кінцевою швидкістю та вихровою дисипацією (рис. 1).

Результати показують, що за допомогою модифікованої моделі перетворення паливного шару можна досягти досить точних прогнозів температури газу в камері згоряння та концентрації СО у відхідних газах.

Окрім використання деревини у якості біопалива також застосовують виноградну лозу, відходи якої можуть слугувати для виробництва теплової енергії у побутових опалювальних приладах. У роботі [7] залишки обрізок виноградників були зібрані, гранульовані, а потім охарактеризовані відповідно до стандарту твердого біопалива. Випробування спалювання проводилися в котлі потужністю 150 кВт, що працює на пелетах, та вимірювали відповідні емісії СО, NO_x і загальну

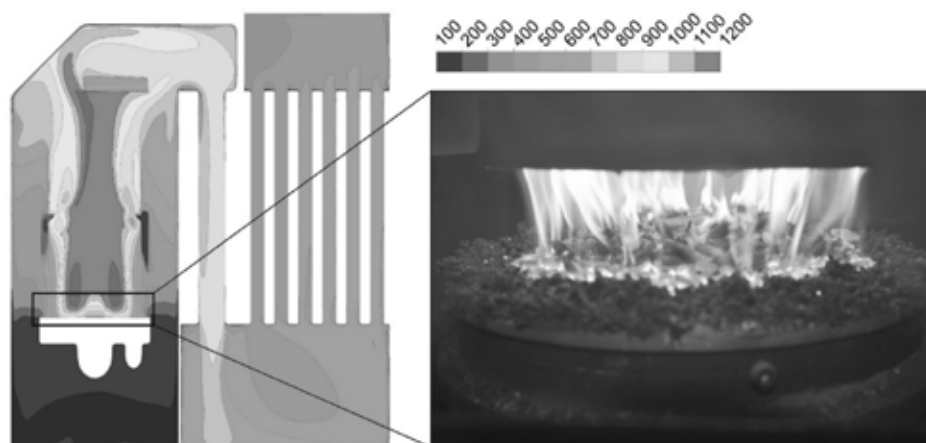


Рис. 1. Поле температури [°C] у перерізі котла і фото згоряння твердого палива при нормальній роботі [6]

кількість зважених частинок. Для порівняння із викидами залишків обрізків виноградарників у відкритому ґрунті було проведено імітаційне тестування в лабораторних масштабах. Викиди на відкритому повітрі перевищують викиди котла до 120 разів для концентрації CO та в 30 разів для золи. Результати підкреслюють, що, уникаючи спалювання на відкритому повітрі та використовуючи цю залишкову біомасу для виробництва енергії, можна досягти значного зменшення забруднення навколишнього середовища разом із збільшенням виробництва енергії з відновлюваних джерел.

Таким чином, біомаса в промисловості може використовуватися безпосередньо як сировина для спалювання в енергетичних котлах, спалюватися разом з вугіллям, а також перетворюватися на рідке чи газоподібне біопаливо.

Рідке біопаливо. Як рідке паливо, виготовлене з біомаси, яке використовується для енергетичних цілей, біорідини можуть включати широкий спектр біосирин та проміжних енергоносіїв. Вченими досліджуються такі види рідкого біопалива: біомасла швидкого піролізу, біосировина гідротермального зрідження, прості рослинні олії, біоспирти [8]; рідке паливо з поліетиленового воску [9]; біопаливо з пальмової олії, кулінарних відходів, метилові ефіри рапсової олії [10].

У роботі [8] систематично та цілісно висвітлюється використання цих біорідин з точки зору проблем, пов'язаних із властивостями палива, необхідними адаптаціями двигуна та довговічністю обладнання, що завершується аналізом продуктивності й викидів. Методологічно дослідження бере початок з аналізу технологій переробки сировини і палива, які вирішальним чином впливають на властивості палива. Розглядаються можливості

для утилізації відходів, що виникають у результаті постійно зростаючого циклічного використання матеріалів і ресурсів. Крім того, представлено інноваційні пропозиції та майбутні можливості для подальших технічних удосконалень у всьому циклі виробництва і споживання, що слугує орієнтиром для майбутніх досліджень та розробок у швидкозростаючій сфері біорідин.

Досліджено можливість використання поліетиленового воску у якості рідкого палива за допомогою процесу некаталітичного піролізу за температур 400, 450 і 500°C [9]. Результати показують, що при температурі піролізу 450°C найвищий вихід рідкого продукту становить 78,24%, а залишком є неконденсований газ і тверде паливо. Аналіз елементного складу показує, що продукти, отримані в результаті піролізу, мають подібні компоненти для всіх умов. Питома вага, в'язкість і теплотворна здатність піролізного масла відповідає звичайним стандартам дизеля.

Доступні відновлювані види палива відрізняються за своїми характеристиками. Були випробувані три відновлювані вуглеводневі види палива [10]: кокосова олія, пальмова олія та метилові ефіри кулінарної і рапсової олії, разом із трьома звичайними видами палива: стандартним реактивним паливом (JP-8), стандартним дизельним паливом та природним газом. Кінцевою метою даного дослідження було порівняння структур полум'я, хемілюмінесценції та викидів забруднюючих речовин різних видів палива з використанням технології «розподіленого» горіння на основі вихрового пальника потужністю 13,3 кВт. Порівнюючи розрахункові характеристики розпилення, було виявлено, що реактивне і дизельне паливо та кокосовий біодизель мають найвищий потенціал

для розподіленого спалювання в газових турбінах, тоді як неправильне налаштування пальника може призвести до неприйнятно високих викидів.

Альтернативне газоподібне паливо. Пряме згоряння твердого палива в енергетичних котлах викликають декілька проблем, таких як корозія, відкладення золи на теплообмінних поверхнях котла та енергозатратність підготовки палива до спалювання. Однією з можливостей уникнути вищезгаданих проблем є непряме спільне спалювання попередньо обробленої біомаси у вигляді рідкого біопалива або синтез-газу.

Газифікація – це термохімічний процес, при якому вуглецеві компоненти палива перетворюються на горючий газ, так званий синтез-газ. Газифікація є дуже перспективною технологією для енергетичних цілей, особливо в районах, багатих ресурсами широко доступної біомаси. Для цієї мети можна використовувати тверді чи рідкі відходи, оскільки енергія, вироблена з компонентів відходів, що розкладаються, класифікується як відновлювана енергія.

Синтетичний газ може бути отриманий шляхом газифікації вугілля з подальшим процесом метанування та за допомогою ферментації вуглеводів бактеріями в анаеробному середовищі (перетравлення біомаси, наприклад, гною, деревини, соломи та зернових). Синтез-газ складається з легкозаймистих компонентів, а саме з водню, монооксиду вуглецю і метану, інертних газів, певної кількості ненасичених вуглеводнів (C_2H_2 , C_6H_6), а також забруднювачів, таких як сірководень (H_2S), аміак (NH_3), смоли, галогени та пил. Отриманий склад синтез-газу і його забруднень залежить від складу палива, типу газифікатора та робочих умов процесу (температура, тиск, час перебування). Усі ці робочі умови й параметри впливають на теплотворну здатність синтез-газу.

Спалювання синтез-газу. Вченими була проведена низка експериментальних і чисельних досліджень характеристик горіння синтез-газу.

Park [11] проаналізував вплив складу синтез-газу і розбавлення азотом (N_2) на характеристики згоряння і викидів NO для багатих на CO , H_2 і CH_4 синтез-газів протитечійного дифузійного полум'я. На основі чисельних результатів детально обговорюються основні характеристики й точна структура протитечійного дифузійного полум'я нерозбавленого і розбавленого азотом синтез-газу $CO/H_2/CH_4$, включаючи вплив температури, мольні частки компонентів, швидкість утворення NO . У факелах синтез-газу з сильно розбавленим N_2 швидкість утворення NO підвищується за рахунок

збільшення вмісту H_2 і CH_4 та за рахунок зменшення вмісту CO в паливі. Завдяки підвищенню розбавлення азотом шляхом швидкого й повторного спалювання внесок NO зменшувався для синтез-газу, багатого на CH_4/CO , і збільшувався для синтез-газу, багатого на H_2 . Систематично визначені домінуючі фізичні процеси і хімічні реакції, що впливають на точну структуру полум'я та емісії NO , які зустрічаються у фактичних умовах спалювання синтез-газу.

Mehregan [12] розглянув вплив концентрації кисню, температури попереднього підігріву забаластованого окисника і типу розбавляючої речовини на викиди NO_x безполум'яного згоряння біогазу в конфігурації дифузійного спалювання. Параметрами дослідження та їх рівнями були види баласту (N_2 і CO_2), концентрація кисню (5, 7 і 10%) і температура попередньо нагрітого повітря при 900, 1100 і 1300 К. Біогаз утворений з об'ємів 60% CH_4 і 40% CO_2 , тоді як окислювач розбавлений одночасно N_2 , CO_2 і попередньо нагрітий. Встановлено, що збільшення емісії NO_x більш чутливе до концентрації кисню, ніж до температури повітря попереднього нагріву. На викиди NO_x незначно впливають види домішок, тоді як емісія зменшується завдяки розведенню N_2 , а не CO_2 . Згідно з дисперсним аналізом, найвпливовішими факторами на викиди NO_x є концентрація кисню і температура попередньо нагрітого повітря.

Samiran [13] експериментально досліджував характеристики стабілізації факела кінетичного вихрового полум'я синтез-газу, насиченого CO , в умовах горіння збідненої суміші в газотурбінній камері згоряння. Синтез-газ, збагачений CO , був повністю змішаний з повітрям і розріджувачами CH_4 і CO_2 перед запалюванням на виході з пальника. Зображення полум'я показує, що синтез-газ із помірним вмістом CO створює менш яскраве і більш компактне полум'я, ніж синтез-газ з високим вмістом CO , що означає нижчу тенденцію до утворення сажі. Синтетичні гази з високим вмістом CO демонструють явно менші викиди NO_x порівняно з базовим рівнем чистого полум'я.

Розглянуті дослідження свідчать про те, що викиди NO_x залежать від умов експлуатації обладнання і конфігурації факелу, а полум'я синтез-газу, збагачене CO , може генерувати високий рівень забруднювачів і парникових газів.

Слід зазначити, що не останню роль в ефективності топкового процесу відіграє технологія горіння, яка реалізує процес горіння того чи іншого палива. Технології спалювання, які розроблені в «КПІ імені Ігоря Сікорського» [14, 15],

вигідно відрізняються від найбільш поширених реєстрових пальників меншими гідравлічними втратами по тракту окисника, що створює передумови для розширення коефіцієнта регулювання робочого діапазону потужності вогнетехнічного устаткування. Розробки засновані на ефектах взаємодії набігаючого потоку окисника на поганообтічне тіло (кутники, перфоровані поверхні, циліндричні канали з розширенням і т.д.) зі струменями палива, що відіграють роль стабілізатору полум'я. У випадку подачі палива перпендикулярно до набігаючого потоку повітря перед зривною кромкою поганообтічного тіла, нішевої порожнини (струменево-нішева система), чи зривною кромкою плоского пілону (струменево-стабілізаторні пальники) відбувається гідродинамічна стабілізація полум'я [15]. В інших пальниках НТУУ «КПІ» [16] використано підхід на основі введення палива безпосередньо у зону зворотних струмів за стабілізатором (струменеві і трубчасті пальники та пальники з кутовими стабілізаторами полум'я). Ці конструкції пальників мають суттєві переваги у порівнянні із реєстровими, зокрема автономність процесу сумішоутворення в області введення палива у широких діапазонах швидкостей [15], і, таким чином, є перспективною паливоспалюючою технологією у першу чергу для газоподібного палива.

Висновки. За результатами аналізу останніх досягнень в області спалювання різних альтернативних палив у топкових камерах з'ясовано, що приділяється чимала увага характеристикам горіння деревних й агропелет, біомасел та синтез-газу, а також питанням емісії шкідливих оксидів у продуктах спалювання. Серед вчених, які зосе-

реджені на дослідженні синтетичних газів, більшість пропонує додавання горючих газів різного складу у продукти газифікації для енергетичних цілей. Утилізація відходів і використання біомаси належним чином здатна покращити стан навколишнього середовища та знизити енергозалежність держави від викопного палива.

Огляд сучасних технологій спалювання показує необхідність універсалізації пальників стосовно можливостей застосування відповідно до регламенту вогнетехнічного обладнання. У зазначеному аспекті, технології спалювання «КПІ імені Ігоря Сікорського» є перспективними засобами використання палива, які широко апробовані та впроваджені на багатьох об'єктах України. Технології спалювання «КПІ» весь час удосконалюються, проходячи експерименти в лабораторних умовах перед виходом у промислове використання.

Значна частина наукових джерел у представленому напрямі досліджень присвячена результатам отриманим не лише фізичними експериментами, а й за допомогою спеціальних програмних пакетів, завдяки чому перевіряються розрахунки та більш точно визначаються необхідні параметри. CFD моделювання дозволяє швидко створити потрібний об'єкт і процес згоряння палива у ньому. Потрібно зазначити, що можливості обчислення комп'ютерної техніки обмежені, тобто чим складніша задача тим більше часу потрібно для її розрахунку, або необхідна більш потужна обчислювальна машина. Також важливим аспектом застосування комп'ютерного моделювання при дослідженні процесів горіння є наявність експериментальних даних для проведення валідації отриманих розрахункових результатів.

Список літератури:

1. Енергетична стратегія України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність»: Розпорядження Кабінету Міністрів України від 18.08.2017 № 605-р. Режим доступу: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/file/text/58/f469391n10.pdf>.
2. Директива (ЄС) 2018/2001 Європейського Парламенту та Ради від 11 грудня 2018 року про сприяння використанню енергії з відновлюваних джерел. 2018. Режим доступу: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uriserv:OJ.L_.2018.328.01.0082.01.ENG&toc=OJ:L:2018:328:TOC.
3. Паризька угода. Офіційний вебпортал парламенту України. Режим доступу: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_161#Text.
4. Стратегія низьковуглецевого розвитку України до 2050 року. Режим доступу: https://razumkov.energy/files/docs/Proekt/LEDS_ua_last.pdf.
5. Horvat I., Dović D., Filipović P. Numerical and experimental methods in development of the novel biomass combustion system concept for wood and agro pellets. *Energy*. 2021. Т. 231. С. 120929. URL: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120929>.
6. CFD modelling of air staged combustion in a wood pellet boiler using the coupled modelling approach / T. Zdravac та ін. *Thermal Science and Engineering Progress*. 2020. Т. 20. С. 100715. URL: <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2020.100715>.

7. Emissions of heating appliances fuelled with agropellet produced from vine pruning residues and environmental aspects / A. Pizzi та ін. *Renewable Energy*. 2018. Т. 121. С. 513–520. URL: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.01.064>.
8. Bioliquids and their use in power generation – A technology review / T. Seljak та ін. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2020. Т. 129. С. 109930. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109930>.
9. Alternative liquid fuel from pyrolysis of polyethylene wax / C. Chaiya та ін. *Energy Reports*. 2020. Т. 6. С. 1262–1267. URL: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.11.045>.
10. Mixture Temperature-Controlled combustion of different biodiesels and conventional fuels / G. Hidegh та ін. *Energy*. 2021. Т. 234. С. 121219. URL: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121219>.
11. Park S., Kim Y. Effects of nitrogen dilution on the NO_x formation characteristics of CH₄/CO/H₂ syngas counterflow non-premixed flames. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2017. Т. 42, № 16. С. 11945–11961. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.02.080>.
12. Mehregan M., Moghiman M. A numerical investigation of preheated diluted oxidizer influence on NO_x emission of biogas flameless combustion using Taguchi approach. *Fuel*. 2018. Т. 227. С. 1–5. URL: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.04.049>.
13. Swirl stability and emission characteristics of CO-enriched syngas/air flame in a premixed swirl burner / N. A. Samiran та ін. *Process Safety and Environmental Protection*. 2017. Т. 112. С. 315–326. URL: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2017.07.011>.
14. Siryi, O. A., Abdulin, M. Z., & Kobylanska, O. O. (2022). Energy-ecological assessment of the boiler equipment modernized with the jet-niche technology. *Journal of Mechanical Engineering – Problemy mashynobuduvannia*, vol. 25, no. 3, pp. 46–55. <https://doi.org/10.15407/pmach2022.03.046>.
15. Сірий О.А. Вплив параметрів струменево-нішевої системи на робочий процес пальникових пристроїв : дис. канд. техн. наук : 05.14.14 / О.А. Сірий. – Київ, 2016. – 194 с.
16. Mykhailo Abdulin, Oleksandr Siryi, Tetiana Sheleshei, Energy and ecological assessment of gas burning boiler equipment, 2022 IEEE 8th INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENERGY SMART SYSTEMS, October 12-14, 2022, <http://ess.ieee.org.ua>.

Shakhbazov I.O., Siryi O.A. PERSPECTIVES OF THE USE OF BIOFUEL IN HOUSEHOLD BOILER INSTALLATIONS

At the current stage of industrial development, under existing man-made loads on the environment, harmonious development of the economy, energy and ecology is important. For this, it is necessary to introduce new technologies based on alternative and renewable energy sources (RES), and measures to reduce emissions of harmful substances into the environment. There are several program documents in the world, including state strategies, which are designed to counteract the excessive formation of pollutants and stimulate the promotion of RES in the energy sectors, in particular, alternative fuels from biomass. Although biomass production and conversion to fuel is under scrutiny due to land-use change, as a well-managed renewable resource, biomass can make a significant contribution to the development of a sustainable economy. This work presents a review of foreign literature on the use of alternative fuels. A broad analysis of the achievements in this field has been carried out and it has been found that most scientists, who focus on the synthetic gases research, propose the addition of combustible gases of various compositions to the gasification products for energy purposes. According to the results of the scientific works review, it was found that considerable attention is paid to the combustion characteristics of wood and agricultural pellets, bio-oils and synthetic gas, as well as to the issue of the harmful oxides emission in combustion products. On the basis of the presented works, which include experimental studies and mathematical modeling of fuel combustion, promising directions for the use of alternative fuel from biomass are determined. In addition, the development of CFD models of fuel combustion in combustion chambers is considered, the creation of which requires specialized programs, that is a modern approach in the study of any fuels.

Key words: combustion chamber, biofuel, pellets, biodiesel, synthetic gas, nitrogen oxides, carbon oxides.

Відомості про авторів

Андрєв С.М. – студент кафедри автоматизації та систем неруйнівного контролю Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Баженов В.Г. – кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації та систем неруйнівного контролю Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Баклан І.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформатики та програмної інженерії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Баранюк О.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри атомної енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»; старший науковий співробітник Інституту теплоенергетичних технологій Національної академії наук України

Березюк І.А. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації виробничих процесів Центральноукраїнського національного технічного університету

Бернацький А.В. – кандидат технічних наук, старший дослідник, завідувач відділу «Спеціалізована високовольтна техніка та лазерне зварювання» Інституту електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України

Бібик В.В. – кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри електронних приладів і автоматики Конотопського інституту Сумського державного університету

Богдан Г.А. – кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації та систем неруйнівного контролю Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Болобан О.А. – аспірант кафедри системного проектування Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Бондаренко Д.О. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних систем Харківського національного економічного університету імені Семена Кузнеця

Бондарєва В.І. – заступник завідувача відділу «Спеціалізована високовольтна техніка та лазерне зварювання» Інституту електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України

Босий М.В. – викладач кафедри матеріалознавства та ливарного виробництва Центральноукраїнського національного технічного університету

Бочок В.О. – аспірант 1 курсу групи ТВ-21ф кафедри інженерії програмного забезпечення в енергетиці Навчально-наукового інституту атомної та теплової енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Бригдалов М.В. – студент 3 курсу групи 3151 кафедри програмного забезпечення автоматизованих систем Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

Бурик І.П. – кандидат фізико-математичних наук, доцент, старший викладач кафедри електронних приладів і автоматики Конотопського інституту Сумського державного університету

Бурик М.П. – кандидат технічних наук, доцент кафедри теоретичної електротехніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Вишемірська Я.С. – старший викладач кафедри автоматизованого управління технологічними процесами Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського

Войцеховська О.О. – доктор філософії, асистент кафедри системного аналізу та інформаційних технологій Вінницького національного технічного університету

Воловик А.Ю. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем Вінницького національного технічного університету

Волошко О.В. – асистент кафедри виробництва приладів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Воробйов М.В. – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри атомної енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»; старший науковий співробітник Інституту теплоенергетичних технологій Національної академії наук України

Гавриленко В.В. – доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач кафедри інформаційних систем та технологій Національного транспортного університету

Галаган Р.М. – кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації та систем неруйнівного контролю Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Глоба Л.С. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри інформаційно-комунікаційних технологій та систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Голощанов С.С. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри експлуатації суднового електрообладнання та засобів автоматики Херсонської державної морської академії

Горбань Г.В. – кандидат технічних наук, доцент кафедри інженерії програмного забезпечення Чорноморського національного університету імені Петра Могили

Грабовський Є.М. – кандидат економічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних систем Харківського національного економічного університету імені Семена Кузнеця

Гричановська Т.М. – кандидат фізико-математичних наук, завідувач кафедри електронних приладів і автоматики Конотопського інституту Сумського державного університету

Гузь Д.Р. – магістр кафедри автоматизації енергетичних процесів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Гуйда О.Г. – кандидат наук з державного управління, доцент, завідувач кафедри комп'ютерних та інформаційних технологій Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського

Демська Н.П. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки Харківського національного університету радіоелектроніки

Демченко М.О. – асистент кафедри виробництва приладів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Довбиш І.О. – студентка 2 курсу групи ПК-11 кафедри автоматизації та систем неруйнівного контролю приладобудівного факультету Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Дядюн Н.А. – студент Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Євсєєв В.В. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки Харківського національного університету радіоелектроніки

Загреба А.Я. – студент 4 курсу групи ДК-92 кафедри конструювання електронно-обчислювальної апаратури Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Заїка Н.В. – науковий співробітник відділу сертифікації Державного науково-дослідного інституту технологій кібербезпеки та захисту інформації

Зилевич М.О. – аспірант кафедри конструювання електронно-обчислювальної апаратури Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Івохін Є.В. – доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри системного аналізу та теорії прийняття рішень Київського національного університету імені Тараса Шевченка

Івохіна К.Є. – PhD студент кафедри інформаційних систем та технологій Національного транспортного університету

Камінський С.С. – студент 4 курсу групи 4151 кафедри програмного забезпечення автоматизованих систем Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

Кандиба І.О. – доктор філософії, старший викладач кафедри інженерії програмного забезпечення Чорноморського національного університету імені Петра Могили

Ківа І.Л. – кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютерних та інформаційних технологій Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського

Кінзерський А. – магістрант кафедри загальної фізики та моделювання фізичних процесів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Ковтонюк І.Ю. – старший викладач кафедри вищої математики Національного авіаційного університету

Колебанов О.К. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри експлуатації суднового електрообладнання та засобів автоматики Херсонської державної морської академії

Колодежний В.А. – старший викладач кафедри динаміки і міцності машин та опору матеріалів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Коновалов О.Ю. – кандидат технічних наук, викладач вищої категорії Київського фахового коледжу зв'язку

Кононова І.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційно-комунікаційних технологій та систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Корнєв В.П. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри конструювання електронно-обчислювальної апаратури Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Кострова Г.Ю. – аспірант кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки Харківського національного університету радіоелектроніки

Котякова М.Г. – аспірантка кафедри автоматизовані електромеханічні системи в промисловості та транспорті Криворізького національного університету

Кравченко О.С. – студент кафедри виробництва приладів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Кунах Н.І. – доктор технічних наук, професор, викладач вищої категорії Київського фахового коледжу зв'язку

Курганов І.Д. – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри автоматизації, комп'ютерних наук та інформаційних технологій Криворізького національного університету

Кувовий О.П. – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник Центру воєнно-стратегічних досліджень Національного університету оборони України імені Івана Черняхівського

Лебедев Д.Ю. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри конструювання електронно-обчислювальної апаратури Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Лисенко Ю.Ю. – кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації та систем неруйнівного контролю Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Лісовець С.М. – кандидат технічних наук, доцент, завідуючий кафедри автоматизованого управління технологічними процесами Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського

Лободзинський В.Ю. – кандидат технічних наук, доцент кафедри теоретичної електротехніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Любицький С.В. – старший викладач кафедри автоматизації енергетичних процесів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Макарова Л.М. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри програмного забезпечення автоматизованих систем Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

Манько О.О. – доктор технічних наук, професор, викладач вищої категорії Київського фахового коледжу зв'язку

Маріяш Ю.І. – асистент кафедри автоматизації енергетичних процесів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Марченко Н.Б. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютеризованих систем управління Національного авіаційного університету

Мацуй А.М. – доктор технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації виробничих процесів Центральноукраїнського національного технічного університету

Мельничук Б.П. – студент першого курсу групи ПБ-21мп кафедри виробництва приладів, приладобудівного факультету Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Мовчан Н.С. – аспірант кафедри біокібернетики та аерокосмічної медицини Національного авіаційного університету

Могилевич Д.І. – доктор технічних наук, професор, завідувач спеціальної кафедри №3 Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Момот А.С. – доктор філософії, старший викладач кафедри автоматизації та систем неруйнівного контролю Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Монченко О.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри біокібернетики та аерокосмічної медицини Національного авіаційного університету

Муравйов О.В. – кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації та систем неруйнівного контролю Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Наритник Т.М. – кандидат технічних наук, професор, професор кафедри телекомунікацій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Наритник Т.М. – кандидат технічних наук, професор, Академік Української академії наук, директор Інституту електроніки та зв'язку Української академії наук

Невлюдов І.Ш. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки Харківського національного університету радіоелектроніки

Нікіфоренко К.Б. – кандидат технічних наук, викладач вищої категорії Київського фахового коледжу зв'язку

Новіков П.В. – кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації енергетичних процесів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Овчарук А.О. – аспірант 1 курсу групи 172-22а кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем Вінницького національного технічного університету

Омецинська Н.В. – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри загальноінженерних дисциплін та теплоенергетики Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського

Павлов В.Г. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри обчислювальної техніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Павлов Л.М. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри конструювання електронно-обчислювальної апаратури Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Петренко А.І. – доктор технічних наук, професор кафедри системного проектування Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Петрик В.О. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри динаміки і міцності машин та опору матеріалів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Петрик В.Ф. – кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації та систем неруйнівного контролю Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Попель В.А. – начальник відділу сертифікації Державного науково-дослідного інституту технологій кібербезпеки та захисту інформації

Прокопець В.А. – аспірант 4 курсу групи ТІ-91ф кафедри інформаційно-комунікаційних технологій та систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Протасов А.Г. – доктор педагогічних наук, кандидат технічних наук, професор, професор кафедри автоматизації та систем неруйнівного контролю Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Редько І.В. – доктор фізико-математичних наук, професор кафедри конструювання електронно-обчислювальної апаратури Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Рудоман Н.В. – здобувач кафедри інформаційних систем та технологій Національного транспортного університету

Сайко В.Г. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри прикладних інформаційних технологій Київського національного університету імені Тараса Шевченка

Самченко Т.В. – старший науковий співробітник відділу речовин і матеріалів Науково-випробувального центру Інституту державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

Сарнацький В.В. – аспірант 4 року навчання групи ПІ-91ф кафедри інформатики та програмної інженерії факультету інформатики та обчислювальної техніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Семенов А.О. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри інформаційних радіо-електронних технологій і систем Вінницького національного технічного університету

Семенова О.О. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інфокомунікаційних систем і технологій Вінницького національного технічного університету

Семичаєвський С.В. – старший науковий співробітник відділу пожежно-рятувальної техніки та обладнання Науково-випробувального центру Інституту державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

Сербул О.М. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації виробничих процесів Центральноукраїнського національного технічного університету

Сивобородько А.В. – заступник начальника центру Українського науково-дослідного інституту спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України

Сінчук І.О. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизовані електромеханічні системи в промисловості та транспорті Криворізького національного університету

Сіора О.В. – науковий співробітник відділу «Спеціалізована високовольтна техніка та лазерне зварювання» Інституту електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України

Сірий О.А. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри теплової та альтернативної енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»; Інститут теплоенергетичних технологій Національної академії наук України

Скакун О.В. – старший науковий співробітник Українського науково-дослідного інституту спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України

Скриннік І.О. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри будівельних, дорожніх машин і будівництва Центральноукраїнського національного технічного університету

Соколовський М.В. – провідний інженер відділу «Спеціалізована високовольтна техніка та лазерне зварювання» Інституту електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України

Сотніченко Ю.О. – викладач вищої категорії Київського фахового коледжу зв'язку

Степанець О.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації енергетичних процесів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Степанчук Д.К. – студент кафедри інтелектуальних інформаційних систем Чорноморського національного університету імені Петра Могили

Сторожик Д.В. – аспірант кафедри автоматизації та систем неруйнівного контролю Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Ткачук А.Г. – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри робототехніки, електроенергетики та автоматизації ім. проф. Б.Б. Самотокіна Державного університету «Житомирська політехніка»

Трубачев С.І. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри динаміки і міцності машин та опору матеріалів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Трушаков Д.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації виробничих процесів Центральноукраїнського національного технічного університету

Ушакова І.О. – кандидат економічних наук, доцент, завідувач кафедри інформаційних систем Харківського національного економічного університету імені Семена Кузнеця

Федорова Н.В. – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри інженерії програмного забезпечення в енергетиці Навчально-наукового інституту атомної та теплової енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Федотова М.О. – кандидат технічних наук, асистент, асистент кафедри автоматизації виробничих процесів Центральноукраїнського національного технічного університету

Філіппова М.В. – доцент кафедри виробництва приладів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Фісун М.Т. – доктор технічних наук, професор кафедри інженерії програмного забезпечення Чорноморського національного університету імені Петра Могили

Харлай Л.О. – кандидат технічних наук, доцент, викладач вищої категорії Київського фахового коледжу зв'язку

Хльоба А.А. – магістр 1 курсу групи РТ-22м кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем Вінницького національного технічного університету

Цяпа С.М. – старший науковий співробітник Українського науково-дослідного інституту спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України

Чубко Л.С. – кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри біотехнологій Національного авіаційного університету

Чумаченко С.М. – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, лауреат Державної премії в галузі науки і техніки, Голова громадської організації «Асоціація фахівців цивільного захисту», професор кафедри інформаційних технологій, штучного інтелекту і кібербезпеки Національного університету харчових технологій

Шамсутдінова Н.О. – інженер відділу «Спеціалізована високовольтна техніка та лазерне зварювання» Інституту електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України

Шахбазов І.О. – магістрант 2 курсу групи ТУ-11мн кафедри теплової та альтернативної енергетики, Навчально-науковий інститут атомної і теплової енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Шевченко В.В. – кандидат технічних наук, доцент кафедри виробництва приладів, приладобудівного факультету Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Штіфзон О.Й. – старший викладач кафедри автоматизації енергетичних процесів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Щиголь Ю.Ф. – кандидат юридичних наук, доцент спеціальної кафедри № 1 Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Яганов П.О. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри конструювання електронно-обчислювальної апаратури Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

НОТАТКИ

Науковий журнал

**ВЧЕНІ ЗАПИСКИ
ТАВРІЙСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
ІМЕНІ В.І. ВЕРНАДСЬКОГО**

Серія: Технічні науки

Том 34 (73) № 2 2023

Частина 1

Коректура • *Н. Славогородська*

Комп'ютерна верстка • *Н. Кузнєцова*

Адреса редакції:

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

м. Київ, вул. Джона Маккейна, 33

Електронна пошта: editor@tech.vernadskyjournals.in.ua

Сторінка журналу: www.tech.vernadskyjournals.in.ua

Формат 60×84/8. Гарнітура Times New Roman.

Папір офсетний. Цифровий друк. Обл.-вид. арк. 28,71. Ум. друк. арк. 35,57. Зам. № 0523/331

Підписано до друку 05.06.2023. Наклад 150 прим.

Видавництво і друкарня – Видавничий дім «Гельветика»

65101, м. Одеса, вул. Інглезі, 6/1

Телефони: +38 (095) 934 48 28, +38 (097) 723 06 08

E-mail: mailbox@helvetica.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

ДК № 7623 від 22.06.2022 р.