

**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 33 (72) № 3 2022



Видавничий дім
«Гельветика»
2022

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 інженерної екології 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 № 17 від 30.05.2022 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, 2022

ЗМІСТ

ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ У МАШИНОБУДУВАННІ

Хміль Н.В., Колесніков В.Г., Хміль С.І.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ РЕВІТАЛІЗАЦІЇ

МАСТИЛЬНО-ОХОЛОДЖУВАЛЬНИХ РІДИН В МЕТАЛООБРОБНІЙ ПРОМИСЛОВОСТІ.....1

КОРАБЛЕБУДУВАННЯ

Яглицький Ю.К., Кириченко К.В.

ДОСЛІДЖЕННЯ КОНЦЕПЦІЇ ВІРТУАЛЬНОЇ МОДЕЛІ СУДНА

У ЧОТИРИВИМІРНМУ ПРОСТОРИ.....6

РАДІОТЕХНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

Семенов А.О., Семенова О.О., Пінаєв Б.О., Білик О.В., Шпильовий О.О.

ДОСЛІДЖЕННЯ ГУСТИНИ ПОТОКУ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

ВІД ЕЛЕМЕНТАРНОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО ВИПРОМІНЮВАЧА У БЛИЖНІЙ

ТА ПРОМІЖНИХ ЗОНАХ.....13

ІНФОРМАТИКА, ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ

Арпентій С.П.

ТЕХНОЛОГІЯ ОПТИМАЛЬНОГО РОЗПОДІЛУ ШВИДКОСТЕЙ ТА ВІРТУАЛЬНИХ

ОПОРНИХ КАДРІВ ДЛЯ ВИСОКОЕФЕКТИВНОГО КОДУВАННЯ ВІДЕО.....20

Вакалюк Т.А., Янчук В.М., Чижмотря О.В., Чижмотря О.Г., Гришкун Є.О., Лаговський О. М.

ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ РОЗРОБКИ МОДУЛЯ БАГАТОВАЛЮТНОСТІ

ДЛЯ РУШІЯ OPENCART.....31

Завгородній В.В., Завгородня Г.А., Валявська Н.О., Герасименко О.О.,

Калюжний О.В., Степовий А.В.

ПОШУК АНОМАЛІЙ У ДАНИХ ЗА ДОПОМОГОЮ МАШИНОГО НАВЧАННЯ.....39

Кандиба І.О., Горбань Г.В., Фісун М.Т., Ткаченко М.П.

ДОСЛІДЖЕННЯ АПАРАТНО-ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ЛОКАЛЬНОЇ МЕРЕЖІ

ЗАКЛАДУ ВИЩОЇ ОСВІТИ ЗАСОБАМИ МОВИ PYTHON.....44

Касіяненко Д.В.

АУТЕНТИФІКАЦІЯ КОРИСТУВАЧІВ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ КЛАВІАТУРНОГО ПОЧЕРКУ.....50

Лубко Д.В., Шаров С.В., Зінов'єва О.Г.

ПРОЕКТУВАННЯ ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ РОБОТИ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ЛІНІЇ

ПРИБИРАННЯ ГНОЮ НА ТВАРИННИЦЬКІЙ МОЛОЧНІЙ ФЕРМІ.....56

Окунькова О.О.

ВІЗУАЛІЗАЦІЯ ДАНИХ. ВІД ПРОСТОГО ДО СКЛАДНОГО.....61

Проскурєнко Д.М., Третяк О.В., Філіппова М.В.

АВТОМАТИЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ПІДГОТОВКИ

ОДИНИЧНОГО ТА ДРІБНОСЕРІЙНОГО ВИРОБНИЦТВА.....67

Хлопенко М.Я., Хлопенко І.М.

МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНОМУ

АСИНХРОННОМУ ЕЛЕКТРОПРИВОДІ СУДНОВОГО V-ПОДІБНОГО

ДВОСТУПІНЧАСТОГО ПОРШНЕВОГО КОМПРЕСОРА.....73

ХІМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Казимиренко Ю.О., Лебедєва Н.Ю., Макруха Т.О.

ЗАСТОСУВАННЯ ЗОЛЬНИХ МІКРОСФЕР ДЛЯ ФОРМУВАННЯ КОМПОЗИЦІЙНИХ

ПОКРИТТІВ НА СТАЛІВІЙ ПОВЕРХНІ.....81

Лебедєв В.В., Мірошніченко Д.В., Савченко Д.О., Тихомирова Т.С.
РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ГІБРИДНИХ ЕКОЛОГІЧНО ЧИСТИХ
БІОДЕГРАДАБЕЛЬНИХ ПЛІВОК З БАКТЕРИЦИДНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ87

Штефан В.В., Баламут Н.С., Кануннікова Н.О., Кобзєв О.В.
ІМПУЛЬСНИЙ ЕЛЕКТРОЛІЗ ХРОМОКСИДНОГО ПОКРИТТЯ НА НЕРЖАВІЮЧИЙ СТАЛІ.....92

ТРАНСПОРТ

**Мельник О.М., Волянська Я.Б., Калініченко Є.В., Логінов О.В., Корякін К.С.,
Бурлаченко Д.А., Щєнявський Г.С.**
ВИКОРИСТАННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
НА ВОДНОМУ ТРАНСПОРТІ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЇХ РОЗВИТКУ..... 99

ЕЛЕКТРОНІКА

Осадчук О.В., Осадчук В.С., Осадчук Я.О.
ДОСЛІДЖЕННЯ АВТОГЕНЕРАТОРНИХ ПАРАМЕТРИЧНИХ ОПТИЧНИХ СЕНСОРІВ.....106

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ.....115

CONTENTS

MATERIAL PROCESSING IN MECHANICAL ENGINEERING

Khmil N.V., Kolesnikov V.G., Khmil S.I.

EXPERIMENTAL STUDY OF LUBRICANT-COOLING LIQUIDS REVITALIZATION
FOR METAL-WORKING INDUSTRY.....1

SHIPBUILDING

Yahlytskyi Yu.K., Kyrychenko K.V.

RESEARCH OF THE CONCEPT OF THE VIRTUAL VESSEL MODEL
IN FOUR-DIMENSIONAL SPACE.....6

RADIO ENGINEERING AND TELECOMMUNICATIONS

Semenov A.O., Semenova O.O., Pinaiev B.O., Bilyk O.V., Shpylovyi O.O.

STUDY OF THE ELECTROMAGNETIC RADIATION FLUX DENSITY FROM
AN ELEMENTARY ELECTRICAL EMITTER IN THE NEAR AND INTERMEDIATE ZONES.....13

INFORMATICS, COMPUTER ENGINEERING AND AUTOMATION

Arpentii S.P.

TECHNOLOGY OF OPTIMAL DISTRIBUTION OF SPEED
AND VIRTUAL SUPPORT FRAMES FOR HIGHLY EFFICIENT VIDEO CODING..... 20

Vakaliuk T.A., Yanchuk V.M., Chyzhmotria O.V., Chyzhmotria O.H., Gryshkun Ie.O., Lagovskii O.M.

THEORETICAL ASPECTS OF THE DEVELOPMENT OF A MULTI-CURRENCY MODULE
FOR THE OPENCART ENGINE.....31

**Zavgorodnii V.V., Zavgorodnya A.A., Valyavska N.O., Gerasimenko O.O.,
Kalyuzhny O.V., Stepovy A.V.**

SEARCHING FOR ANOMALIES IN MACHINE LEARNING DATA39

Kandyba I.O., Horban H.V., Fisun M.T., Tkachenko M.P.

INVESTIGATING THE HARDWARE STATUS OF THE UNIVERSITY'S LOCAL NETWORK
USING PYTHON..... 44

Kasiianenko D.V.

USER AUTHENTICATION BASED ON KEYSTROKE DYNAMICS ANALYSIS..... 50

Lubko D.V., Sharov S.V., Zinovieva O.H.

DESIGN OF THE SIMULATION MODEL OF WORK OF THE TECHNOLOGICAL LINE
OF CLEANING OF MANURE ON THE ANIMAL DAIRY FARM..... 56

Okunkova O.O.

DATA VISUALIZATION. FROM SIMPLE TO COMPLEX..... 61

Proskurenko D.M., Tretiak O.V., Filippova M.V.

AUTOMATION OF TECHNOLOGICAL PREPARATION OF UNIT AND SMALL
SERIES PRODUCTION..... 67

Khlopenko N.Ya., Khlopenko I.N.

SIMULATION OF TRANSIENT PROCESSES IN A FREQUENCY-CONTROLLED
ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE OF A MARINE V-TYPE TWO-STAGE
RECIPROCATING COMPRESSOR.....73

CHEMICAL TECHNOLOGY

Kazymyrenko Yu.O., Lebedeva N.Yu., Makrukha T.O.

APPLICATION OF ASH MICROSPHERES FOR FORMATION OF COMPOSITE COATINGS
ON STEEL SURFACE..... 81

Lebedev V.V., Mirosnichenko D.V., Savchenko D.O., Tykhomyrova T.S.

DESIGN AND RESEARCHING OF HYBRID ECO-FRIENDLY BIODEGRADABLE FILMS
WITH BACTERICIDAL PROPERTIES..... 87

Shtefan V.V., Balamut N.S., Kanunnikova N.O., Kobziev O.V.
PULSE ELECTROLYSIS OF CHROMOXIDE COATING ON STAINLESS STEEL.....92

TRANSPORT

**Melnyk O.M., Volianska Ya.B., Kalinichenko Ye.V., Lohinov O.V., Koryakin K.S.,
Burlachenko D.A., Shcheniavskiy G.S.**
INFORMATION TECHNOLOGY IMPLEMENTATION
ON WATER TRANSPORT AND PROSPECTS FOR THEIR DEVELOPMENT.....99

ELECTRONICS

Osadchuk A.V., Osadchuk V.S., Osadchuk I.O.
RESEARCH OF AUTOGENERATOR PARAMETRIC OPTICAL SENSORS.....106

INFORMATION ABOUT AUTHORS.....115

ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ У МАШИНОБУДУВАННІ

УДК 577.3:57.086.8

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.3/01>**Хміль Н.В.**

Інститут радіофізики та електроніки імені О.Я. Усикова Національної академії наук України

Колесніков В.Г.

Інститут радіофізики та електроніки імені О.Я. Усикова Національної академії наук України

Хміль С.І.

Харківський підшипниковий завод «ХАРП»

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ РЕВІТАЛІЗАЦІЇ МАСТИЛЬНО-ОХОЛОДЖУВАЛЬНИХ РІДИН В МЕТАЛООБРОБНІЙ ПРОМИСЛОВОСТІ

У статті розглядається питання контролю реальної частини комплексної діелектричної проникності (ϵ') та динамічного поверхневого натягу (σ) напівсинтетичної мастильно-охолоджуючої рідини (МОР) в умовах металообробної промисловості на етапах відновлення змащувальних властивостей за рахунок екзогенних та ендогенних метаболітів мікрофлори МОР. Стверджується, що мікрохвильова діелектрометрія області γ -дисперсії діелектричної проникності вільної води (частота генерації діода Гана 37,7 ГГц) при одночасному sweer-режимі частот акустичного діапазону 20...25000 Гц є інструментом контролю якісних показників металообробних емульсій. Основним елементом експериментального комплексу є хвилевідна лінія Р1-39 (8-мм діапазон), атенюатор, п'єзоплатформа, вимірювальна п'єзокювета, реєструючий комплекс. Фіксована частота генерації міліметрового випромінювання забезпечила прецизійну оцінку зміни гідратації позаклітинних та внутрішньоклітинних метаболітів мікрофлори МОР (за інтегральною зміною кількості вільної та зв'язаної води металообробної емульсії). Проводилися спектрофотометричні вимірювання: спектри поглинання екзо- та ендометаболітів системи «МОР-мікрофлора» аналізували на довжинах хвиль ультрафіолетового та видимого діапазонів. Показано збільшення відносної кількості вільної води при розведенні відпрацьованої МОР свіжоотриманою МОР з коефіцієнтом розведення (DF – dilution factor) $DF=10$ та $DF=8$, при цьому $\Delta\epsilon' = 0,016 \times 10^{-10}$ Ф/м та $\Delta\epsilon' = 0,063 \times 10^{-10}$ Ф/м, відповідно. За цих умов параметр σ наближався до значення поверхневого натягу контрольних зразків, можливо за рахунок органічних метаболітів контамінуючої мікрофлори, що підтверджується даними спектрального аналізу у видимій області довжин хвиль.

Застосування системи контролю діелектричної проникності та динамічного поверхневого натягу МОР на виробництві забезпечить регулювання оптимальної концентрації мікрофлори для безперебійного циклу подачі емульсії з оптимальними змащувальними характеристиками в процесі виробництва деталей. Отримані експериментальні дані показали доцільність впровадження системи контролю в технологію інтенсивного та економічно вигідного відновлення змащувальних та охолоджувальних властивостей металообробних емульсій у масштабах виробництва.

Ключові слова: мікрохвильова діелектрометрія, мастильно-охолоджувальні рідини, ревіталізація, мікрофлора, діелектрична проникність, динамічний поверхневий натяг.

Постановка проблеми. Економічні та екологічні проблеми сьогодення спонукають до раціонального використання дороговартісних ресурсів на виробництві, в тому числі мастильно-охолоджувальних рідин (МОР). Світові виробники пропонують різноманітні МОР на органічній і синтетичній

основі – Adrana, Cimpro, Sky. Ці емульсії забезпечують належну якість обробки металів на етапах токарної обробки та шліфування виробів [1, с. 74], але в той же час мають певні терміни використання: як правило, більшу вартість мають МОР з більшим пролонгованим часом використання. В собівар-

тості продукції українських металообробних підприємств значну частину (до 30 відсотків) займає вартість МОР. Тому однією з нагальних задач металообробних підприємств є оптимізація параметрів «вартість-термін використання» МОР, які пропонуються світовими виробниками МОР, таких брендів як «Shell», «Mobil» та ін. Провідні виробники МОР рекомендують повну заміну діючої речовини в системах забезпечення робочого циклу обробки металів від 1-го місяця (МОР на органічній основі) до 1-го року (МОР на синтетичній та напівсинтетичній основах). Тому на сьогодні актуальним є питання подовження експлуатаційних властивостей МОР в умовах діючого виробництва в Україні тим паче, якщо виробництво періодично простоє через надзвичайні обставини – воєнні дії та пандемію Covid-19. Одним із факторів забруднення МОР є контамінація мікрофлорою – бактеріями, мікрободоростями, цвілевими грибами, що приводить до неякісної обробки деталей та масштабної відбраковки. Знезараження МОР проводять із застосуванням біоцидів та антибіотиків, що не завжди доречно, так як провокує забруднення навколишнього середовища та викликає захворювання алергічного генезу у заводського персоналу [2, с. 4; 3, с. 11]. Фізичні методи відновлення хіміко-технічних властивостей МОР – лазерне випромінювання, ультразвук, ультрафіолет на сьогодні реалізуються лише в умовах експериментально-дослідного виробництва та потребують технічної модернізації [4, с. 168].

Сучасні трибологічні дослідження спрямовані на розвиток нової концепції ревіталізації МОР, в основі якої лежать біохімічні властивості екзогенних та ендогенних метаболітів, що продукуються мікрофлорою МОР у процесі її життєдіяльності [5, с. 360]. При цьому надійний контроль фізико-хімічних та біологічних властивостей МОР повинен забезпечуватися набором інструментів та критеріїв, що дозволяють об'єктивно та швидко реєструвати зміни у системі «МОР-мікрофлора» протягом робочого циклу та вчасно корегувати їх.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогодні концепція створення регенеративної системи МОР на мікробіологічній основі підтверджується теоретичними та експериментальними дослідженнями біологічних властивостей метаболітів мікрофлори. Насамперед, це актуально з економічної точки зору, оскільки природні жирні кислоти, сполуки сірки є аналогами для заміни компонентів мінеральних масел, що входять до складу МОР. Ці дослідження сприяють розвитку оригінального напрямку ревіталізації МОР, в основі якого є здат-

ність мікрофлори утворювати біоплівки на поверхні оброблюваних деталей за рахунок метаболітів – екзополісахаридів або ендогенних внутрішньоклітинних ліпідних включень, яким притаманна, за певних умов, змащувальна властивість [6, с. 152].

На даний час Європейською комісією стандарту якості поки що не розроблені чіткі рекомендації щодо використання мікрофлори в якості відновлювальної та стабілізуючої ланки, тому дослідження залишаються на рівні лабораторних експериментально-виробничих ліній. В роботі [5, с. 359] представлено експериментальний матеріал стосовно покращення змащувальних властивостей МОР за рахунок екзо- та ендометаболітів мікроорганізмів із застосуванням триботестера Брюггера. Трибологічні випробування показали залежність показника теста Брюггера від концентрації мікрофлори: емульсія з концентрацією мікрофлори $\geq 10^8$ клітин/мл характеризувалася вищим показником теста Брюггера ~ 50 Н/мм². Крім того, температурний фактор, чистота культури мікрофлори, алгоритм додавання спеціальних речовин в дослідне середовище вплинули на успішність підвищення змащувальної здатності між металообробним середовищем і деталями та інструментом, які оброблюються. У цих трибологічних дослідженнях залишаються відкритими питання, пов'язані з механізмами, що забезпечують змащувальну здатність емульсій, а також додатковими критеріями, що дозволяють регулювати участь біологічної клітинної системи для забезпечення регламентованих до ДСТУ властивостей емульсій.

Постановка завдання. Метою роботи є експериментальне дослідження діелектричної проникності та динамічного поверхневого натягу МОР в присутності екзогенних та ендогенних метаболітів мікрофлори МОР для відновлення змащувальної та охолоджувальної здатності напівсинтетичної металообробної рідини.

Виклад основного матеріалу дослідження. Мікрохвильова діелектрометрія в комплексі зі *sweep*-режимом акустичного діапазону [7, с. 40] є прецизійним та доступним методом вимірювання параметрів діелектричної проникності та динамічного поверхневого натягу рідин. Поряд з резонансними методами [8, с. 403], спектроскопією та квазіоптичними вимірюваннями в терагерцовому діапазоні електромагнітного спектру [9, с. 99], мікрохвильова діелектрометрія на частотах γ -дисперсії діелектричної проникності вільної води має можливість аналізувати діелектричну проникність МОР, а також

конформаційні зміни білкових, глікопротеїнових та гліколіпідних макромолекул мікрофлори МОР, якою вона контамінується у процесі експлуатації [10, с. 1762]. За допомогою цього методу були отримані показники ϵ' та σ свіжоотриманих МОР на різній основі та МОР різних строків експлуатації [7, с. 40; 10, с. 1764], а також запропоновані підходи відновлення властивостей МОР шляхом застосування терагерцевого лазера [4, с. 168] та барботування [11, с. 37]. При цьому наявність генераторної та хвилевідної бази міліметрового та субміліметрового діапазонів українського виробництва сприяли технічній реалізації вимірювань на досить високому рівні з мінімальними часовими витратами та незначною трудомісткістю.

В експерименті досліджувалась напівсинтетична водорозчинна МОР, яка використовується у великомасштабних безперервних процесах змащування та охолодження металу при виготовленні шарикових та роликів підшипників. Концентрація МОР розводили водою до концентрації робочого розчину 5,0–7,0%. Хіміко-технічні характеристики свіжоотриманої МОР та відпрацьованої МОР представлені в таблиці 1.

В експерименті був використаний апаратурно-реєструючий комплекс на базі хвилевідної НВЧ-діелектрометрії міліметрового діапазону радіохвиль; фіксована частота генерації міліметрових хвиль ($f=37,7$ ГГц) забезпечувалася діодом Гана. На виході 8-мм хвилевіду розміщувалася вимірювальна п'єзокювета, яка у *sweep*-режимі модулювалася частотами акустичного діапазону ($f=20\dots25000$ Гц). Методика вимірювання дозволила одночасно реєструвати зміну параметрів ϵ' та σ відносно контрольних зразків та докладно описана в роботі [11, с. 36]. Відносна похибка визначення ϵ' склала $\pm 0,7\%$, абсолютна похибка визначення ϵ' склала $\pm 1,73 \times 10^{-12}$ Ф/м.

Оцінка біологічного зараження напівсинтетичної МОР проводилася шляхом підрахунку кількості колонієутворюючих одиниць (КУО) в одиниці

об'єму (1 мл) через 3 місяці експлуатації, що склало $3,1 \times 10^5$ КУО/мл. Результати мікроскопії виявили присутність спороутворюючих та споронеутворюючих бактерій родів *Bacillus*, *Citrobacter*, *Pseudomonas*, *Desulfovibrio* а також мікроводоростей – представників відділу *Chlorophyta* та *Cyanobacteria*.

Спектри поглинання контрольних (свіжоотримана МОР) і дослідних (відпрацьована МОР та відпрацьована МОР розведена свіжоотриманою з певним коефіцієнтом розведення DF (DF – dilution factor)) реєстрували на спектрофотометрії СФ-4 в діапазоні довжин хвиль $\lambda = 316\dots700$ нм при температурі $t = 20 \pm 1^\circ\text{C}$.

Відпрацьована МОР є багатокомпонентною рідиною, суттєву неоднорідність якій додає присутність біологічної системи. Хід кривих, представлених на рисунку 1 має складну форму; спектральний аналіз є результатом суперпозиції спектрів поглинання різних хімічних компонентів. Для відпрацьованої МОР наявність піку між $\lambda = 650$ – 655 нм належить молекулам хлорофілу *a* зелених мікроводоростей та ціанобактерій. Пігменти мікроводоростей (каротиноїди) і фікобіліпротеїни мають максимум поглинання світла в більш короткохвильовій ділянці спектру $\lambda = 420$ – 480 нм, ніж молекули хлорофілу. В експерименті спектри поглинання фікобіліпротеїнів виражені досить суттєво на довжинах хвиль $\lambda = 545$ – 550 нм.

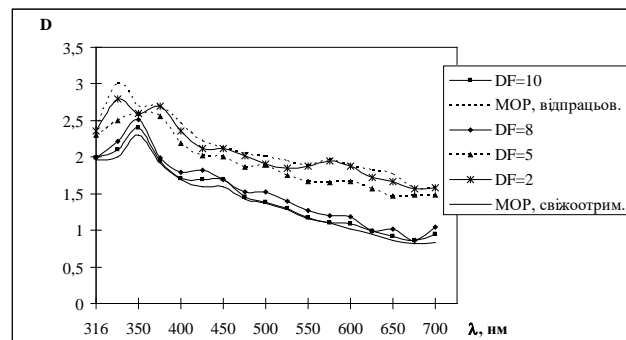


Рис. 1. Спектральна залежність оптичної щільності для контрольних та дослідних зразків МОР

Таблиця 1

Хіміко-технічні характеристики напівсинтетичної МОР

| Параметр | Вимоги згідно нормативним документам | Фактичні значення | |
|---------------------------|--------------------------------------|------------------------------|---|
| | | Контроль (МОР свіжоотримана) | Дослід (МОР відпрацьована, 3 місяці експлуатації) |
| Концентрація, % | 5,0–7,0 | 5,7 | 5,2 |
| Механічні домішки, мг/л | не більше ніж 300 | 11,0 | 167,0 |
| Корозійний вплив на метал | відсутній | витримано | не витримано |
| pH | 8,8–10,0 | 9,6 | 8,9 |
| Біостійкість, бал | не більше 2 | 0 | 3 |

Максимум поглинання в області довжин хвиль $\lambda = 316\text{--}350$ нм обумовлений спектрами поглинання амінокислот, білкових та фенольних сполук, а також метаболітів мікрофлори – альгінатів, парамілону та ксантаніну [12, с. 148; 13 с. 3220], механізм дії яких на поверхню металу планується з'ясувати в наступному дослідженні із застосуванням методів молекулярного докінгу та молекулярної динаміки. Хоча, наразі, за присутністю спектрів поглинання, можна стверджувати про позитивний вплив метаболітів мікрофлори на параметри ϵ' та σ МОР (табл. 2).

Таблиця 2
Діелектрична проникність та динамічний поверхневий натяг МОР свіжоотриманої, МОР відпрацьованої та МОР відпрацьованої з певним DF

| Зразки МОР | Параметр | |
|---|---|-----------------------|
| | $\epsilon' \times 10^{-10} \cdot \Phi/\text{м}$ | $\sigma, \text{мН/м}$ |
| Контроль МОР (свіжоотрим.) | 1,918 | 65,1 |
| МОР (відпрацьов.) (3 місяці експлуатації) | 1,548 | 52,5 |
| DF = 10 | 1,902 | 64,9 |
| DF = 8 | 1,855 | 63,7 |
| DF = 5 | 1,604 | 52,9 |
| DF = 2 | 1,552 | 52,7 |

Експериментальне дослідження діелектричної проникності та динамічного поверхневого натягу контрольних зразків МОР показало різницю в цих параметрах в залежності від фізико-хімічних характеристик МОР, які вони набули при експлуатаційному навантаженні впродовж трьох місяців; різниця в значеннях ϵ' та σ по відношенню до

контрольних зразків складала $\Delta\epsilon' = 0,37 \times 10^{-10} \Phi/\text{м}$, $\Delta\sigma = 12,6 \text{ мН/м}$, відповідно. В ході експерименту реєстрували залежність параметрів ϵ' та σ від коефіцієнту розведення МОР (DF). По відношенню до відпрацьованих зразків показано, що для відпрацьованої напівсинтетичної емульсії розведеною свіжоотриманою МОР з DF = 10 та DF = 8, було характерно збільшення параметру ϵ' ; при DF = 10 реєстрували максимальне наближення значення ϵ' до значень ϵ' контрольних зразків. Суттєве збільшення параметру σ при DF = 10 ($\Delta\sigma = 12,4 \text{ мН/м}$) та DF = 8 ($\Delta\sigma = 11,2 \text{ мН/м}$) по відношенню до відпрацьованої МОР інтегрально відображає зміну кількісного та якісного складу поверхнево-активних речовин МОР і вказує на присутність органічної складової екзо- та ендометаболітів мікрофлори МОР, яким також притаманні поверхнево-активні властивості.

Висновки. Застосування результатів даної експериментальної роботи на Харківському підшипниковому заводі дозволило подовжити строки використання напівсинтетичної МОР на різних ділянках виробництва в 1,3–1,8 рази. Запропонований підхід, на основі позитивного ефекту метаболітів мікрофлори МОР, розглядається з точки зору зниження впливу затрат на закупівлю МОР, а також на собівартість продукції та екологічні аспекти металообробного підприємства.

Роботу виконано в рамках договору про науково-практичне співробітництво між ІРЕ ім. О.Я. Усикова НАН України та ПАТ «Харківський підшипниковий завод «ХАРП»». Автори висловлюють вдячність колективу хіміко-технологічної лабораторії за методичну допомогу у проведенні дослідження та конструктивні поради щодо змісту роботи.

Список літератури:

1. Sultana N., Dhar N.R., Zaman R.B. A review on different cooling/lubrication techniques in metal cutting. *American Journal of mechanics and applications*. 2019. Vol. 7, №4. P. 71–87. doi:10.11648/j.ajma.20190704.11.
2. Nowak P., Kucharska K., Kaminski M. Ecological and health effects of lubricant oils emitted into the environment. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2019. Vol. 16, 3002. P. 1–13. doi:10.3390/ijerph16163002.
3. Passman, F.J., Kuenzi P. Microbiology in water-miscible metalworking fluids. *Tribology Transactions*. 2020. Vol. 63, № 6. P. 1–47. doi:10.1080/10402004.2020.1764684.
4. Хмель Н.В. Эффективность применения терагерцового излучения при контаминации микрофлорой смазочно-охлаждающих жидкостей. *Серия «Биология, химия»*. 2014. Том. 27(66), № 2. С. 165–171.
5. Redetzky M., Rabenstein A., Palmowski B., Brinksmeier E. Microorganisms as a replacement for metal working fluids. *Advanced Materials Research*. 2014. Vols. 966–967. P. 357–364. doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.966-967.357.
6. Redetzky M., Rabenstein A., Seidel B., Brinksmeier E., Wilhelm H. The influence of cell counts, cell size, EPS and microbial inclusions on the lubrication properties of microorganisms. *Production Engineering Research and Development*. 2015. Vol. 9, №2. P. 149–159. doi:10.1007/s11740-014-0592-5.

7. Колесников В.Г., Хмель Н.В., Хмель С.И. Оценка биологического заражения смазочно-охлаждающей жидкости в миллиметровом диапазоне радиоволн. *Физика живого*. 2012. Том. 20, № 2. С. 38–42.
8. Afsar M, Ding H. A novel open-resonator system for precise measurement of permittivity and loss-tangent. *IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement*. 2001. Vol. 50. P. 402–405.
9. Мериакри В.В. Диэлектрическая спектроскопия мм и субмм диапазонов волн и её применения. *Радиотехника*. 2005. № 8. С. 97–102.
10. Khmil N.V., Kolesnikov V.G. Evaluation of permittivity and surface tension of organic and synthetic lubricated and cooling liquids. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2017. Vol. 76, № 19. P. 1761–1767. doi:10.1615/TelecomRadEng.v76.i19.60.
11. Хміль Н.В., Колесніков В.Г., Хміль С.І. Експериментальне дослідження діелектричної проникності та динамічного поверхневого натягу мастильно-охолоджувальних рідин при барботуванні. *Радіофізика та електроніка*. 2021, Том. 26, № 4. С. 34–39. doi:10.15407/rej.
12. Salgado L.T., R. Tomazetto L.P., Cinelli M.F., Filho G. M. A. The influence of brown algae alginates on phenolic compounds capability of ultraviolet radiation absorption in vitro. *Brazilian journal of oceanography*. 2007. Vol. 55, №2. P. 145–154. doi:10.1590/S1679-87592007000200007.
13. Sundarrajan P., Eswaran P., Marimuthu A., Subhadra L.B., Kannaiyan P. One pot synthesis and characterization of alginate stabilized semiconductor nanoparticles. *Bulletin of the Korean Chemical Society*. 2012. Vol. 33, №10. P. 3218–3224. doi:10.5012/bkcs.2012.33.10.3218.

Khmil N.V., Kolesnikov V.G., Khmil S.I. EXPERIMENTAL STUDY OF LUBRICANT-COOLING LIQUIDS REVITALIZATION FOR METAL-WORKING INDUSTRY

The control of dielectric constant (ϵ') and dynamic surface tension (σ) of semi-synthetic lubricant and cooling liquid (LCL) in the metalworking industry at the stages of the restoration of lubricating properties of LCL due to exogenous and endogenous microflora's metabolites was considered. The microwave dielectrometry of the region of γ -dispersion of the dielectric constant of free water (Ghana's diode generation frequency 37.7 GHz) with simultaneous sweep-mode of acoustic range 20...25000 Hz was a tool for quality control of metalworking emulsions.

The main element of the experimental complex was a waveguide line P1-39 (8-mm range), attenuator, piezoplatfom, measuring piezocell, and recording complex. Due to the fixed frequency of millimeter radiation generation, a precise estimate of the change in hydration of extracellular and intracellular metabolites of the LCL's microflora was provided (by an integral change in the amount of free and bound water of the metalworking emulsion).

The spectrophotometric measurements were performed: the absorption spectra of exo- and endomethabolites of the LCL's microflora system were analyzed at the wavelengths of the ultraviolet and visible ranges. An increase in the relative amount of free water when diluting spent LCL by freshly LCL with dilution factor (DF) DF=10 and DF=8 is shown, with $\Delta\epsilon' = 0.063 \times 10^{-10}$ F/m and $\Delta\epsilon' = 0.016 \times 10^{-10}$ F/m, respectively. Under these conditions, the parameter σ approached the value of the surface tension of the control samples, possibly due to organic metabolites of the contaminating microflora, which is confirmed by the data of spectral analysis in the visible region of wavelengths.

The application of the dielectric constant control system and dynamic surface tension of the LCL in the industry will provide regulation of the optimal concentration of microflora for a smooth cycle of emulsion supply with optimal lubricating characteristics in the production process. The obtained experimental data showed the feasibility of implementing a control system in the technology of intensive and cost-effective restoration of lubricating and cooling properties of metal-working emulsions on a production scale.

Key words: *microwave dielectrometry, lubricant-cooling liquids, revitalization, microflora, dielectric constant, dynamic surface tension.*

КОРАБЛЕБУДУВАННЯ

УДК 629.5.001:004.942

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.3/02>

Яглицький Ю.К.

Херсонський навчально-науковий інститут

Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

Кириченко К.В.

Херсонська державна морська академія

ДОСЛІДЖЕННЯ КОНЦЕПЦІЇ ВІРТУАЛЬНОЇ МОДЕЛІ СУДНА У ЧОТИРИВИМІРНІЙ ПРОСТОРИ

На світових ринках морської техніки в даний час відбуваються значні зміни, які пов'язані з оптимізацією виробничо-технологічних процесів, впровадженням автоматизованих систем проектування і управління, розрахунком життєвого циклу виробів, масовим використанням сучасних інформаційно-обчислювальних систем. Зростаюча конкуренція у світовій практиці суднобудування, що постійно змінює набір інструментів САПР, змушує проєктні організації звертатися до нових технологій проектування [1, с. 237]. Однією з самих обговорюваних технологій останніми роками є технологія створення інформаційної 4D-моделі судна, що об'єднує параметричну 3D-модель з графіками календарно-мережевого планування.

Інформаційна 4D-модель судна робить можливою реалізацію великих проєктів за рахунок ефективного планування, контролю і управління процесом створення об'єкта, що передбачає наявність великого обсягу інформаційних даних і використання календарно-мережесих графіків. Для складання календарно-мережесих графіків планування, безумовно є потужні програмні комплекси (Microsoft Project, Oracle Primavera та ін.), які використовують класичні інструменти управління проєктами. Однак описуючи склад робіт, їх послідовність і взаємозв'язок, а також ресурси, які необхідні для їх виконання, ці програмні продукти не дають можливості побачити, як будуть виконуватися роботи і який буде отриманий результат. Саме для вирішення цих проблем і створюються комп'ютерні програми, які здійснюють взаємну ув'язку 3D-графічної моделі з часовою шкалою побудови об'єкта і дозволяють набагато ефективніше здійснювати процеси планування і прогнозування, вести контроль термінів і витрати ресурсів, виявляти і запобігати можливим просторово-часовим колізіям при створенні об'єкта (судна).

У статті проаналізовано проблеми, які виникають під час неналежного впровадження нових інформаційних технологій, програмних продуктів та комп'ютерної техніки при створенні судна і зроблені висновки про можливість впровадження і наведені переваги повної віртуальної 4D-моделі судна. Ці питання залишаються актуальними і для сучасних дослідників новітніх інформаційних технологій створення віртуальних моделей судна.

Ключові слова: автоматизовані системи проектування і управління, параметрична 3D-модель судна, інформаційна віртуальна 4D-модель судна, календарно-мережеве планування, управління підготовкою виробництва.

Постановка проблеми. У сучасних умовах головною проєктно-технологічною особливістю створення судна є впровадження нових прийомів, систем та способів проектування, що базуються на цифрових методах розробки проєкту, зберіганні та передачі структурованої цифрової інформації на всіх етапах життєвого циклу.

Для складання правильного балансу між перевагами від впровадження нових технологій та

витратами протягом усього життєвого циклу судна необхідно використовувати техніко-економічний підхід до проектування, який орієнтований на впровадження інноваційних технологій інформаційного моделювання та ІТ-приймів, що створюють якісні перетворення у проектуванні суден та управлінні проєктами.

В даний час головним інструментальним засобом, що забезпечує вирішення питань на різних

стадіях проектування, конструкторсько-технологічної підготовки та будівництва судна є електронна 3D-модель судна [2, с. 33], яка повинна застосовуватися за реальною технологією проектування вже починаючи з підписання контракту на проектування і будівництво судна. Потім вона повинна бути інформаційно розширена до масштабів реального судна при розробці техпроєкту, а згодом використана на заводі-будівнику при конструкторсько-технологічній підготовці виробництва і будівництві, а також при швартовних та ходових випробуваннях.

Фактор часу у загальному процесі розробки та будівництва судна також відіграє велику роль – час має бути враховано і включено до створюваної моделі як один з істотних елементів. Таким чином, ми отримуємо *концепцію 4D-моделі продукту (судна)*, яка об'єднує параметричну 3D-модель з графіками календарно-мережевого планування [6, с. 67].

Отже, мета цієї статті – надати рекомендації щодо створення віртуальних моделей судна, які можуть бути використані в якості основи для моделювання різних технологічних процесів, а також багатьох інших видів моделювання, що використовуються при проектуванні і будівництві різних типів суден.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідженням проблемних питань обґрунтування вибору та рекомендацій щодо впровадження в виробництво *концепції 4D-моделі* (четвертий вимір – час життєвого циклу судна), що об'єднує параметричну 3D-модель з графіками календарно-мережевого планування займались німецька компанія SAP, а також Deltamarin – фінська компанія, що спеціалізується на проектуванні суден [3, 4].

Висвітленням питань сучасного стану інформаційного моделювання суден та виробничої інфраструктури суднобудівного підприємства займались автори Горін Е. О., Попадюк С. С., Давидович О. М., Риндін О. А., Куперштейн В. І. [1-2; 5-7] та інші. У відповідних публікаціях розглянуті різні питання проектування суден та підготовки виробництва в суднобудуванні з використанням інформаційних технологій та передумови їх практичного застосування.

Основним завданням даної роботи є необхідність більш наочно розглянути і проаналізувати можливості основних інформаційних технологій та засобів тривимірного проектування і деталізації віртуальної 4D-моделі судна для інформаційного забезпечення різних технологічних процесів в суднобудуванні.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Сьогодні, розглядаючи суднобудівний ринок споживачів систем автоматизованого проектування, можна констатувати, що він більш-менш насичений. Верфі, націлені на інтенсивний та високотехнологічний підхід у проектуванні, здебільшого є власниками різного програмного забезпечення. Серед них – засоби тривимірного проектування, моделювання, проведення інженерних розрахунків та інші програми. Проте закупленим програмним забезпеченням необхідно вміло користуватися – вибудувати технологічний ланцюжок, сформувати єдине середовище проектування, щоб забезпечити наступність переходу об'єкта (судна) на різні стадії життєвого циклу.

Наслідком неналежного впровадження нових інформаційних технологій, програмних продуктів та комп'ютерної техніки при створенні

судна (проектуванні та будівництві) є створення безлічі різних проблем.

Основні серед них такі:

- проєктна документація створюється без моделювання основних функцій судна;
- відсутня ефективна координація та розподіл робіт з проектування та будівництва на верфі;
- відсутня регламентація діяльності численних підрядників, субпідрядників та постачальників;
- не існують загальні для всіх інструменти і методи, які б могли використовуватися на різних стадіях проектування та конструкторсько-технологічної підготовки виробництва;
- на верфях та в проєктних конструкторських бюро суднобудівної галузі застосовується обмежена кількість основних комп'ютерних систем;
- у суднобудівних компаніях під час проектування компонентів судна використовуються різні програмні продукти зі слабкою інтеграцією між ними;
- координація розрізнених зусиль фахівців при проектуванні та будівництві займає багато часу і найчастіше виявляється малоефективною, реальна взаємодія з'являється лише на етапі будівництва;
- помилки, які закладені на ранніх стадіях проектування, виправляються ціною дуже витратних рішень під час будівництва;
- відсутня єдина модель продукту (судна).

Цілком очевидно, що головним інструментом для вирішення цих проблем є створення електронної 3D-моделі судна. В даний момент 3D-моделювання в основному використовується для випуску робочих креслень та проектування

систем у складі конструкцій корпусу судна (рис. 1). Крім того, доводиться констатувати, що техніка комп'ютерного моделювання тривимірного майже не використовується на етапі проектування судна. Хоча, на думку експертів, 3D-моделювання має застосовуватися відповідно до реальної технології проектування вже починаючи з ескізного проекту, а краще ще до підписання контракту на проектування та будівництво судна. Отримана на етапі ескізного проектування 3D-модель згодом може бути розширена до масштабів реального судна під час випуску технічного проекту і в процесі випуску робочої конструкторської документації, а на заводі-будівнику використовуватись від конструкторсько-технологічного опрацювання виробництва та будівництва до швартовних та ходових випробувань, тобто вона повинна містити всю необхідну інформацію.

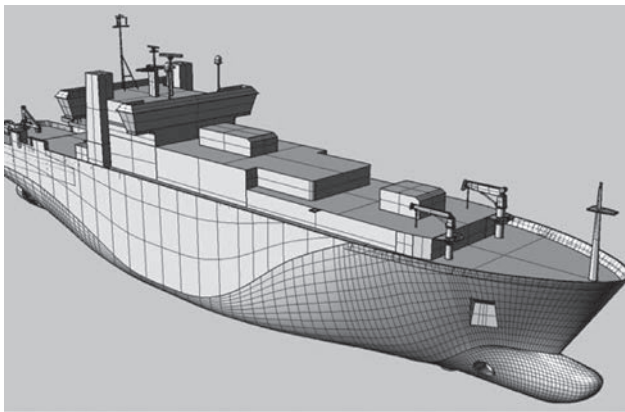


Рис. 1. 3D-модель корпусу судна

Через об'єктивні причини завдання проектування та виготовлення виробів у вітчизняному суднобудуванні вирішуються з використанням САПР різного рівня [7, с. 51]. За допомогою більш простих САПР можна моделювати та обробляти конструкції суден. Під обробкою тут розуміється формування даних (креслень, технологічних документів тощо), які необхідні для виготовлення судна, оперативного формування теоретичної 3D-моделі судна методами, що традиційно застосовуються у суднобудуванні (за допомогою суднобудівних термінів і понять). Надалі, використовуючи інтерфейсні засоби, забезпечується можливість передавати ці моделі в САПР вищого рівня (наприклад, CATIA) і перетворювати їх у необхідний для подальшого конструювання вид. У цьому випадку підготовка конструкторської документації проводиться вже на основі структурованих теоретичних 3D-моделей, що значно спрощує процедуру передачі 3D-моделей та про-

ектно-конструкторської документації замовнику [6, с. 69].

Необхідно також відзначити, що при цьому основним завданням 3D-моделі (на початковому етапі) є візуалізація дизайну інтер'єру судна та моделювання динамічних процесів, що дозволяє будь-якому учаснику створення проекту ясно уявити собі специфічні елементи – наприклад, розташування обладнання у машинному відділенні, канали вентиляції, підйом якоря на транспортному судні тощо.

Практичний досвід створення подібних віртуальних 3D-моделей суден у вітчизняному суднобудуванні та з урахуванням практики зарубіжних компаній дозволяє зробити такі висновки:

- формування віртуальної моделі займає не більше часу, ніж підготовка типових креслень загального розташування;

- візуальне представлення будь-якої нової конструкції судна, приміщення чи розташування обладнання стає більш ефективним;

- модель разом з математичним описом характеристик маневрування

- судна може бути пов'язана з програмою для віртуального моделювання навігації;

- детальна віртуальна модель судна може використовуватися як контрактний документ для будівництва;

- віртуальна модель судна може використовуватися у якості моделі технології будівництва на верфі;

- технічний проєкт судна може бути завершений з використанням тієї ж моделі – з урахуванням вимог класифікаційного товариства, що відносяться до конструкції корпусу судна.

Створені віртуальні 3D-моделі суден можуть бути використані як основа для моделювання різних технологічних процесів, наприклад, для визначення оптимального використання конкретних виробничих потужностей, таких як споруди, цехи, стапелі, спеціалізовані пристрої, для моделювання переміщення матеріалів та виробів (листів, трубопроводів, матеріалів, секцій та складених корпусів тощо), для складання стапельного розкладу, для оптимізації виробничо-технологічних процесів, а також для моделювання рятувальних операцій (як мінімум процесу евакуації пасажирів), за вимогами ІМО. Динамічне моделювання дозволяє визначити необхідний для евакуації час, виявити можливі «вузькі місця». Таким чином, і з цієї точки зору 3D-модель є ефективним інструментом перевірки проєкту на ранній стадії, а також на заключних етапах інженерної розробки.

Для складання календарно-мережевих графіків планування, безумовно є потужні програмні комплекси (Microsoft Project, Oracle Primavera та ін.), які використовують класичні інструменти управління проектами: метод критичного шляху, побудова діаграми Ганта, постановку завдань, відстеження ефективності виконання робіт та ін. Однак описуючи склад робіт, їх послідовність і взаємозв'язок, а також ресурси, які необхідні для їх виконання, ці програмні продукти не дають можливості *побачити*, як будуть виконуватися роботи і який буде отриманий результат. Для успішної реалізації проекту судна з обґрунтованим графіком і оптимальним рівнем витрат необхідні оперативна координація дій виконавців і ефективний розподіл завдань з проектування і будівництва.

Незамінним інструментом керівників усіх рівнів сучасного суднобудівного підприємства має бути проектне управління, як методологія та інструмент планування й контролю робіт з розробки й підготовки виробництва і виготовленню складних технічних систем, якими є вироби суднобудування з високим рівнем складності та невизначеності.

Функціональність управління проектами повинна бути нерозривною частиною великого ERP (Enterprise Resource Planning – планування ресурсів підприємства) – рішення, що управляє господарською діяльністю всіх основних підрозділів та служб суднобудівного підприємства [3]. Це дозволяє реалізувати автоматичний збір актуальної інформації про поточний стан проекту за всіма основними параметрами: терміни, витрати,

виконані роботи, випущена продукція, витрачені ресурси, виручка та платежі, бюджети, завантаження виробничих потужностей та персоналу.

Структура проекту побудови судна складається з таких основних елементів (рис. 2) [3]:

- структурний елемент – завдання чи група завдань, які необхідно вирішити під час виконання проекту;

- операція – конкретна робота, яка має бути виконана з метою реалізації завдання структурного елемента проекту, з яким пов'язана операція;

- етап – інформаційний об'єкт, що пов'язаний з подіями, які мають особливе значення для перебігу проекту.

Створення проекту здійснюється на етапі підготовки та укладання контракту на розробку документації та будівництво нового судна. На початкових етапах має місце недостатність даних, що описують проект, наприклад, не повністю визначено його структуру, приблизні часові терміни тощо. Тому процеси створення структури проекту та пов'язане з нею планування за проектом є динамічними процесами.

У ході реалізації проекту виробничі замовлення (найчастіше це замовлення на виготовлення об'єктів машино-будівної частини), що стосуються даного проекту, можуть бути пов'язані з відповідними операціями мережевого графіка проекту (техкомплектами), що забезпечує акумулювання даних, що відображають процес реалізації виробничого замовлення на відповідному структурному елементі проекту.

Структура проекту є моделлю проекту – ієрархії завдань та робіт, які мають бути реалізовані.

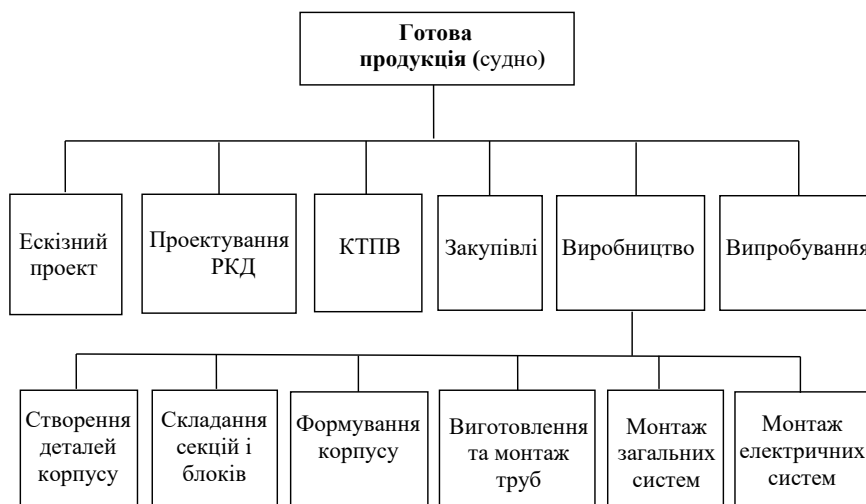


Рис. 2. Структура проекту побудови судна:
 КД – робоча конструкторська документація,
 КТПВ – конструкторсько-технологічна підготовка виробництва

Відповідно, структура проекту є основою для реалізації всіх основних видів планування та управління проектами:

- календарне планування;
- планування закупівель та виробництва;
- планування та балансування завантаження виробничих потужностей;
- планування завантаження трудових ресурсів;
- планування витрат;
- фіксування (доказ) фактичних результатів виробничого процесу.

У суднобудуванні при плануванні виробництва в обов'язковому

порядку використовується методологія *PDCA* («*Plan – Do – Check – Act*» – «*планування – дія – перевірка – коригування*»), яка є алгоритмом дій з управління процесом і досягненню його цілей (рис. 3) [5, с. 168]. До циклу управління процесом побудови судна входять:

- планування – встановлення цілей і процесів, необхідних для їх досягнення; планування робіт по досягненню цілей процесу й задоволенню споживача; планування виділення і розподілу необхідних ресурсів;
- виконання – реалізація запланованих робіт;
- звітність і моніторинг – збір інформації і контроль результату на основі ключових показників, які були одержані в ході виконання робіт; виявлення й аналіз відхилень, встановлення причин відхилень.

– коригуючі дії – вживання заходів по усуненню причин відхилень від запланованого результату, зміни в плануванні й розподілі ресурсів.

Планування виконання суднобудівного замовлення багаторівневе –

воно засноване на побудові мережевих графіків різного рівня. По суті, мережевий графік – це динамічна модель суднобудівного замовлення, що включає виробничий процес, розробку документації та багато інших робіт (завдань). Ця модель відображує технологічну і логічну залежність, послідовність виконання комплексу робіт й пов'язує їх здійснення в часі з урахуванням витрат ресурсів і вартості робіт та виділенням при цьому вузьких (критичних) місць проекту. При цьому існує різна деталізація проекту, яка включає декілька мережевих графіків різного рівня, взаємозв'язаних по ключових точках.

На 1-му рівні деталізації стоїть генеральний графік будівництва, закріплений контрактними зобов'язаннями. Далі на основі генерального графіка (чи графіка 1-го рівня), що включає ключові процеси і контрольні точки (віхи) проекту, а також технологічного графіка, формується календарно-мережевий графік проекту, кожне завдання якого у свою чергу деталізується до локальних графіків виготовлення секцій й приміщень або монтажу конкретного устаткування.

Календарний графік проекту спрощує планування та управління проектами. Він надає



Рис. 3. Цикл *PDCA* в суднобудівному виробництві

графічну картину всього проєкту та пропонує різні функції обробки інформації. З допомогою цих функцій можна, зокрема, проводити календарне планування ресурсів, виконувати балансування завантаження виробничих потужностей, калькулювати витрати.

Для календарного планування проєктів передбачені виробничі календарі та графіки чергування змін на робочих місцях. Поряд із плануванням від початкових та кінцевих термінів для мережевих графіків передбачені інші види календарного планування: наприклад, за допомогою планування «від сьогодні» можна перевірити, чи реальне виконання мережного графіка до певного терміну.

У ході реалізації проєкту виникає необхідність фіксування фактичних даних про виконані роботи та витрачені ресурси. Введення фактичних даних здійснюється за допомогою спеціальної процедури – *підтвердження*. *Підтвердження* мають велике значення для реалістичного та детального управління проєктом. З їхньою допомогою забезпечуються такі функції:

- оновлення інформації щодо завантаження виробничих потужностей;
- оновлення фактичних витрат;
- актуалізація даних операцій мережевого графіка.

За *підтвердженням* реєструються фактичні дані – наприклад, терміни, робоче місце (одиниця обладнання, ділянка, цех), тривалість різних сегментів операції (час налагодження, час обробки тощо), трудомісткість, кількість придатної продукції, табельний номер виконавця, інформація з якості.

Таким чином, можна побачити, що поточне планування, генеральний графік будівництва та інструменти виконання проєкту пов'язані з вірту-

альною 4D-моделлю судна, а оновлення генерального графіка відбувається паралельно з коригуванням моделі.

Повна віртуальна 4D-модель продукту (судна), що включає конструкції, трубопроводи, канали вентиляції, кабельні траси та основні компоненти, а також віртуальна модель верфі з усіма виробничими лініями, кранами й будовними зонами дають можливість легко моделювати процес будівництва судна з різними варіантами рішень для вибору оптимального [8].

Висновки. Узагальнюючи зазначене вище, за результатами оцінювання встановлено, що 4D-модель є більш оптимальною та універсальною в порівнянні з 3D-моделлю судна.

4D-моделювання об'єднує 3D-модель судна і його календарний план будівництва, що дозволяє сформувати візуально підкріплений календарний графік робіт, який дає можливість оптимізувати процес безпосередньо до початку будівництва судна.

Синхронізація 4D-моделі з календарними графіками дозволяє визначити в який момент часу і які конструкції мають бути виготовлені, перевірити елементи судна (деталі, вузли, секції, блоки) на перетини і якісне стикування, базово проаналізувати витрати, перевірити критичні етапи будівництва і т. п.

Використання 4D-моделі знижує кількість і критичність помилок, підвищує продуктивність проєктувальників, значно покращує якість кінцевого продукту (судна).

Детальна віртуальна 4D-модель судна в якості контрактного документу для побудови дозволяє безпосередньо після підписання контракту почати координацію робіт усіх організацій, які залучені в проєкт.

Список літератури:

1. Горин Е. А. Цифровые технологии в отечественном судостроении // Бюллетень науки и практики. Электрон. журн. 2017, № 11 (24), С. 236-242.
2. Попадюк С. 3D-технологии в судостроении // Rational Enterprise Management/ 2017, № 2, С. 32-34.
3. Решение SAP для судостроения [Электронный ресурс] / Офіційний сайт компанії SAP – Режим доступа: <http://www.sap.ru>.
4. Offshore engineering process. Решение DELTAMARIN для судостроения [Электронный ресурс] / Офіційний сайт компанії DELTAMARIN: deltamarin.com
5. Яглицький Ю. К. Підготовка виробництва в суднобудуванні з використанням інформаційних технологій: навчальний посібник / Ю. К. Яглицький. – Миколаїв: НУК, 2018. – 300 с.
6. Давидович А. Н. Использование виртуального и материального цифрового производства – будущее судостроительной отрасли // CADmaster. – 2010. – № 2, С. 66-74.
7. Яглицький Ю. К., Кудашев О. О. Інноваційні інструменти вирішення сучасних завдань суднобудівної промисловості. Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: Матеріали XII Міжнародної науково-технічної конференції. Миколаїв: НУК. 2021, С. 50-52.
8. Макеєв С., Тучков А., Рындин А. Информационное моделирование производственной инфраструктуры судостроительного предприятия // Rational Enterprise Management. Эл. версия., 2019, № 3.

Yahlytskyi Yu.K., Kyrychenko K.V. RESEARCH OF THE CONCEPT OF THE VIRTUAL VESSEL MODEL IN FOUR-DIMENSIONAL SPACE

Significant changes are currently taking place in the world markets of marine technology, which are related to the optimization of production and technological processes, introduction of automated design and control systems, calculation of product life cycle, mass use of modern information and computer systems. Growing competition in the world practice of shipbuilding, which is constantly changing the set of CAD tools, forces design organizations to turn to new design technologies. One of the most discussed technologies in recent years is the technology of creating information 4D-model of the vessel which combines a parametric 3D-model with graphs of network planning.

Information 4D-model of the vessel makes it possible to implement large projects through effective planning, control and management of the process of creating the object, which requires a large amount of information data and the use of calendar and network graphs. To compile calendar-network scheduling schedules, there are certainly powerful software packages (Microsoft Project, Oracle Primavera, etc.) that use classic project management tools. However, describing the composition of the work, their sequence and relationship, as well as the resources needed to perform them; these software products do not provide an opportunity to see how the work will be performed and what the result will be. It is to solve these problems that computer programs are created, which interconnect the 3D-graphic model with the time scale of object construction and allow much more efficient planning and forecasting processes, control the timing and cost of resources, identify and prevent possible space-time collisions when creating an object (vessel).

The article analyzes the problems that arise during the improper implementation of new information technologies, software products and computer technology in the creation of the vessel and draws conclusions about the possibility of implementation and presents the benefits of a complete virtual 4D model of the vessel. These questions remain relevant for modern researchers of the latest information technologies for creating virtual vessel models.

Key words: *automated systems of design and management, parametric 3D-model of the vessel, information virtual 4D-model of the vessel, calendar-network planning, production preparation management.*

РАДІОТЕХНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

УДК 621.371; 537.8

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.3/03>**Семенов А.О.**

Вінницький національний технічний університет

Семенова О.О.

Вінницький національний технічний університет

Пінаєв Б.О.

Вінницький національний технічний університет

Білик О.В.

Вінницький національний технічний університет

Шпильовий О.О.

Вінницький національний технічний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ГУСТИНИ ПОТОКУ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ВІД ЕЛЕМЕНТАРНОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО ВИПРОМІНЮВАЧА У БЛИЖНІЙ ТА ПРОМІЖНИХ ЗОНАХ

Елементарний електричний випромінювач є фундаментальним елементом в теорії технічної електродинаміки та поширення радіохвиль. Він отримав широкого використання як окреме джерело електромагнітного випромінювання, а також як випромінювальний елемент складних антенних систем. Елементарний електричний випромінювач застосовують у всіх діапазонах радіотехнічних частот - на низьких частотах, середніх частотах, високих частотах і надзвичайно високих частотах. Це зумовлено його простотою та зручністю застосування. Тому елементарний електричний випромінювач привертає значну увагу дослідників. Відома велика кількість публікацій, що присвячені дослідженню хвильових явищ при ізотропному поширенні радіохвиль. У цих публікаціях всебічно досліджені фізичні ефекти і явища при поширенні радіохвиль у далекій зоні випромінювання. Менше уваги було приділено дослідженню спрямованих властивостей елементарного електричного випромінювача в близькій та проміжній зонах випромінювання. Ще менше уваги дослідників було приділено дослідженню густини потоку потужності випромінювання у близькій та проміжній зоні випромінювання. У роботі наведено результати модельного дослідження густини потоку потужності електромагнітного випромінювання від елементарного електричного випромінювача у близькій та проміжних зонах. Обґрунтовано математичну модель, яка описує густину потоку потужності електромагнітного випромінювання від елементарного електричного випромінювача у близькій та проміжних зонах. Отримано результати математичного моделювання. Наведено діаграми спрямованості густини потоку потужності електромагнітного випромінювання від елементарного електричного випромінювача у близькій та проміжних зонах у меридіональній площині для стандартів GSM-900 і GSM-1800. Встановлено, що в проміжній зоні випромінювання елементарного електричного випромінювача діаграма спрямованості по формі відрізняється від теоретичної та має місце «розщеплення» двох головних напрямів випромінювання на чотири напрями з поділом густини потужності електромагнітного випромінювання.

Ключові слова: електромагнітне випромінювання, густина потоку, потужність випромінювання, близька зона, проміжна зона, діаграма спрямованості.

Постановка проблеми. Сьогоднішній розвиток інформаційних технологій зумовлений завдяки широкому застосуванню бездротових

з'єднань [1]. Збільшення кількості мобільних пристроїв і перехід на технології 5G зумовлюють зменшення розмірів площ покриття базовими

станціями [2]. Безпосередня близькість роботи мобільних пристроїв біля точок доступу вимагає аналітичного апарату для частотно-територіального планування мобільних мереж [3, 4]. У той же час, у класичній теорії поширення радіохвиль переважають підходи до розрахунку складових потоку електромагнітного поля випромінювання в далекій зоні [5, 6]. Математичному аналізу компонентів електромагнітного поля випромінювання у близькій та проміжній зонах приділено мало уваги внаслідок ускладнення формул для розрахунку.

Елементарний електричний випромінювач має спрямовані властивості, що мало відрізняються від спрямованих властивостей антен кінцевих мобільних пристроїв – усіх можливих варіацій телефонів, планшетів, ноутбуків та ін. Тому дослідження густини потоку електромагнітного випромінювання від елементарного електричного випромінювача у ближній та проміжних зонах має важливе значення з метою інтерпретації отриманих результатів для вирішення таких важливих практичних задач: електромагнітна сумісність бездротових телекомунікаційних пристроїв, бездротове заряджання радіоелектронних пристроїв, аналіз впливу електромагнітного випромінювання на здоров'я людини тощо.

На сьогоднішній день актуальною задачею є вимірювання інтенсивності електромагнітного випромінювання, що спонукає розроблення нових і вдосконалення відомих методів і засобів вимірювання. При цьому потрібно врахувати, що фактичну інтенсивність електромагнітного випромінювання не можливо розрахувати або виміряти, не провівши аналітичні дослідження електромагнітного поля випромінювача в ближній та проміжній зонах випромінювання. Густина потоку потужності залежить від потужності випромінювання бездротових телекомунікаційних пристроїв, відстані до точки спостереження, структури електромагнітного поля в цій точці та спрямованих властивостей антенно-фідерних пристроїв. Тому розвинення теоретичних основ і створення елементів математичних моделей фізичних процесів електромагнітного випромінювання від елементарного електричного випромінювача у ближній та проміжних зонах є актуальним завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботі [3] представлено короткий огляд існуючих розробок у сфері моделей поширення радіохвиль для мереж mmWave 5G у міському макросередовищі для діапазону частот електромагнітних хвиль 28 ГГц. У роботі [3] описано основні фак-

тори, що впливають на результуючий рівень сигналу. Запропоновано узагальнену формулу втрат для каналу mmWave 5G, яка дає змогу більш комплексно врахувати всі фактори: втрати в атмосферних газах, у дощ, а також втрати на проникнення ззовні в приміщення. Запропонована модель може бути застосована для макросценарію мереж 5G, переважно для eMBB. Використання запропонованої узагальненої моделі дозволить більш точно спрогнозувати основні параметри мережі радіодоступу для мобільного зв'язку 5G [3].

У роботах [7, 8] досліджено ефект підвищення енергоефективності в мережах зв'язку LTE [7] і супутникового зв'язку [8] залежно від механізмів поширення радіохвиль. Встановлено, що ефект зниження енергоефективності залежить від конкретної застосованої технології та параметрів передавачів [7]. Запропоновано моделі підвищення ефективності терагерцевих систем радіозв'язку: удосконалений алгоритм пошуку багатопроменевих сигналів у радіосистемах на базі літаків висотного діапазону ТГц та імітаційну модель для прогнозування максимальної довжини системи бездротового зв'язку терагерцевого діапазону [7].

Дослідженню структури електромагнітного випромінювання базових станцій мобільного зв'язку присвячені роботи [9-11]. У роботі [9] подано результати експериментального дослідження рівня сигналів трьох базових станцій телекомунікаційного зв'язку діапазону частот 945 МГц – 2340 МГц. Встановлено, що на потужність радіочастотного сигналу, що випромінюється від базових станцій, впливає багато факторів. Основними з цих факторів є: напрямок головного променя, який залежить від нахилу та напрямку антен на верхній частині базової станції, висота антени та щогли базової станції, відстань від джерел випромінювання, а також кількість антен [9]. Крім того, шлях прямої видимості також є одним із факторів, який істотно впливає на рівень опромінення. Потрібно враховувати наявність перешкод поширення радіохвиль, що складається з фізичних об'єктів, які можуть існувати не лише як будівлі, але й дерева, листя, пагорби та інші вздовж поширення сигналу [9]. У роботах [10, 11] представлено результати досліджень поширення радіохвиль в умовах сучасного міста на частотах 28 ГГц і 38 ГГц [10]. Запропоновано комунікаційно-теоретичну модель, яка дозволяє досліджувати фундаментальні компроміси, що пов'язані зі спільним використанням бездротових ресурсів між трьома типами трафіку 5G, а саме

eMBB, mMTC і URLLC [11]. Дослідження збоїв, проведені на частотах 28 ГГц і 38 ГГц, показали, що стабільне покриття 5G можна досягти за допомогою базових станцій з радіусом осередку 200 метрів [10]. Проте отримані у [9-11] результати стосуються виключно далекої зони випромінювання базових станцій телекомунікаційних систем і не враховують потоки електромагнітного випромінювання у ближній та проміжних зонах.

Постановка завдання. Метою роботи є подальший розвиток елементів математичної моделі елементарного електричного випромінювача та дослідження густини потоку його електромагнітного випромінювання у ближній та проміжних зонах. Для досягнення поставленої мети потрібно вирішити такі завдання: 1) обґрунтувати рівняння густини потоку електромагнітного випромінювання від елементарного електричного випромінювача у ближній та проміжних зонах; 2) удосконалити математичну модель елементарного електричного випромінювача; 3) отримати результати математичного моделювання густини потоку електромагнітного випромінювання у ближній та проміжних зонах базових станцій для діапазонів частот 900 МГц і 1800 МГц.

Виклад основного матеріалу. Аналітичні дослідження структури поля випромінювання елементарного електричного випромінювача у ближній та проміжних зонах були проведені в роботах [12, 13]. Аналітичні співвідношення для розрахунку комплексних амплітуд складових електромагнітного поля в точці приймання при електромагнітному випромінюванні від елементарного електричного випромінювача мають вигляд [13, (1)-(3)]

$$\dot{E}_{mr} = \frac{I_m k^2}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_a}{\epsilon_a}} \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{kr}\right)^4 + \left(\frac{1}{kr}\right)^6} \cdot e^{-j\left(kr + \arctg \frac{1}{kr}\right)} \cdot \cos \theta, \quad (1)$$

$$\dot{E}_{m\theta} = \frac{I_m k^2}{4\pi} \sqrt{\frac{\mu_a}{\epsilon_a}} \cdot \sqrt{\left[\frac{1}{kr} - \left(\frac{1}{kr}\right)^3\right]^2 + \left(\frac{1}{kr}\right)^4} \cdot e^{-j\left(kr + \arctg \frac{kr}{k^2 r^2 - 1} - \frac{\pi}{2}\right)} \cdot \sin \theta, \quad (2)$$

$$\dot{H}_{m\phi} = \frac{I_m k^2}{4\pi} \sqrt{\frac{\mu_a}{\epsilon_a}} \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{kr}\right)^2 + \left(\frac{1}{kr}\right)^4} \cdot e^{-j\left(kr + \arctg \frac{1}{kr} - \frac{\pi}{2}\right)} \cdot \sin \theta, \quad (3)$$

де \dot{E}_{mr} і $\dot{E}_{m\theta}$ це комплексні амплітуди екваторіальної та меридіональної складових електричного поля відповідно; $\dot{H}_{m\phi}$ це комплексна амплітуда екваторіальної складової магнітного поля; I_m це амплітуда гармонічного електричного струму збудження елементарного електричного випромінювача, що має довжину l (рис. 1,а); $k = \omega \sqrt{\mu_a \epsilon_a} = 2\pi/\lambda$ це хвильове число; μ_a , ϵ_a це абсолютна магнітна та абсолютна діелектрична проникності середовища, в якому розташований елементарний електричний випромінювач; r це

відстань від елементарного електричного випромінювача до точки приймання; λ це довжина хвилі; θ це меридіональна кутова координата (рис. 1, а-б). За умов вільного простору в екваторіальній площині елементарний електричний випромінювач, що розташований вертикально, випромінює ізотропно. А тому, в екваторіальній площині елементарний електричний випромінювач не має спрямованих властивостей (рис. 1,в).

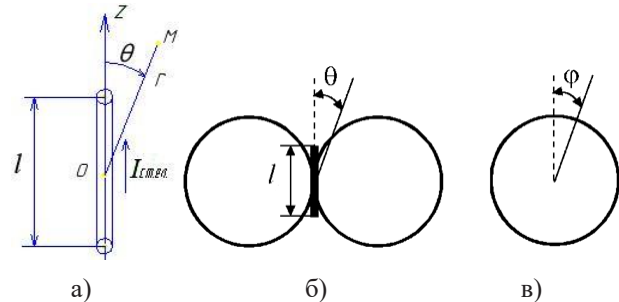


Рис. 1. Зображення елементарного електричного випромінювача із введеною системою координат (а) та його нормовані діаграми спрямованості по електричному полю в меридіональній (б) та екваторіальній (в) площинах

Густина потоку випромінювання фізично описується вектором Пойтінга [12, стор. 2; 14, стор. 1]. Радіальний вектор Пойтінга ($\vec{\Pi}_r$) потоку електромагнітного випромінювання від елементарного електричного випромінювача має комплексний характер, тобто [13, стор. 3]

$$\vec{\Pi}_r = \bar{\Pi}_{ar} + j\bar{\Pi}_{pr}, \quad (4)$$

де $\bar{\Pi}_{ar}$, $\bar{\Pi}_{pr}$ – відповідно активна частина та реактивна частина радіального вектору Пойтінга, що описуються такими співвідношеннями [13, (7)-(8)]

$$\bar{\Pi}_{ar} = \frac{I_m^2 l^2 k^4}{32\pi^2} \sqrt{\frac{\mu_a}{\epsilon_a}} \sqrt{\left[\frac{1}{kr} - \left(\frac{1}{kr}\right)^3\right]^2 + \left(\frac{1}{kr}\right)^4} \times \sqrt{\left(\frac{1}{kr}\right)^2 + \left(\frac{1}{kr}\right)^4} \cos\left(\arctg \frac{kr}{k^2 r^2 - 1} - \arctg \frac{1}{kr}\right) \sin^2 \theta, \quad (5)$$

$$\bar{\Pi}_{pr} = -\frac{I_m^2 l^2 k^4}{32\pi^2} \sqrt{\frac{\mu_a}{\epsilon_a}} \sqrt{\left[\frac{1}{kr} - \left(\frac{1}{kr}\right)^3\right]^2 + \left(\frac{1}{kr}\right)^4} \times \sqrt{\left(\frac{1}{kr}\right)^2 + \left(\frac{1}{kr}\right)^4} \sin\left(\arctg \frac{kr}{k^2 r^2 - 1} - \arctg \frac{1}{kr}\right) \sin^2 \theta. \quad (6)$$

Меридіональний вектор Пойтінга потоку електромагнітного випромінювання від елементарного електричного випромінювача, має лише реактивну складову [13, (9)]

$$\bar{\Pi}_{p\theta} = -\frac{I_m^2 l^2 k^4}{32\pi^2} \sqrt{\frac{\mu_a}{\epsilon_a}} \sqrt{\left(\frac{1}{kr}\right)^4 + \left(\frac{1}{kr}\right)^6} \sqrt{\left(\frac{1}{kr}\right)^2 + \left(\frac{1}{kr}\right)^4} \sin 2\theta. \quad (7)$$

Густина потоку електромагнітного випромінювання є функцією кутових координат і має спрямо-

вані властивості [14, стор. 1]. Подальші аналітичні дослідження потоку електромагнітного випромінювання від елементарного електричного випромінювача було проведено згідно методики [13, стор. 4-5]. З цією метою в роботі [13, стор. 3] введено амплітудний множник, який є спільним для співвідношень (5)-(7) і не залежить ані від кутових координат (θ, φ) , ані від відстані r , та має вигляд

$$A_m = \frac{I_m^2 l^2 k^4}{32\pi^2} \sqrt{\frac{\mu_a}{\epsilon_a}}. \quad (8)$$

З урахуванням амплітудного множника (8) рівняння складових вектору Пойтінга густини потоку електромагнітного випромінювання від елементарного електричного випромінювача мають вигляд [13, (13)-(15)]

$$\begin{aligned} \Pi_{ar} = A \sqrt{\left[\frac{1}{kr} - \left(\frac{1}{kr} \right)^3 \right]^2 + \left(\frac{1}{kr} \right)^4} \times \\ \times \sqrt{\left(\frac{1}{kr} \right)^2 + \left(\frac{1}{kr} \right)^4} \cos\left(\operatorname{arctg} \frac{kr}{k^2 r^2 - 1} - \operatorname{arctg} \frac{1}{kr}\right) \sin^2 \theta, \quad (9) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Pi_{pr} = A \sqrt{\left[\frac{1}{kr} - \left(\frac{1}{kr} \right)^3 \right]^2 + \left(\frac{1}{kr} \right)^4} \times \\ \times \sqrt{\left(\frac{1}{kr} \right)^2 + \left(\frac{1}{kr} \right)^4} \sin\left(\operatorname{arctg} \frac{kr}{k^2 r^2 - 1} - \operatorname{arctg} \frac{1}{kr}\right) \sin^2 \theta, \quad (10) \end{aligned}$$

$$\Pi_{p\theta} = A \sqrt{\left(\frac{1}{kr} \right)^4 + \left(\frac{1}{kr} \right)^6} \sqrt{\left(\frac{1}{kr} \right)^2 + \left(\frac{1}{kr} \right)^4} \sin 2\theta. \quad (11)$$

Амплітудне значення вектору Пойтінга густини потоку електромагнітного випромінювання від елементарного електричного випромінювача, як функція кутової координати θ , має вигляд [13, (16)]

$$\Pi = f(\theta) = \sqrt{\Pi_{ar}^2 + \Pi_{pr}^2 + \Pi_{p\theta}^2}. \quad (12)$$

У роботі було здійснено математичне моделювання з використанням пакету програм MathCad 15.0. Математичну модель густини потоку електромагнітного випромінювання від елементарного електричного випромінювача у ближній та проміжних зонах складають співвідношення (8)-(12). Було побудовано діаграми спрямованості густини потоку електромагнітного випромінювання від елементарного електричного випромінювача у ближній та проміжних зонах для стандартів GSM-900 і GSM-1800 для таких значень відстаней r : 2,5 см; 5 см; 7,5 см; 10 см; 12,5 см; 15 см; 30 см і 50 см. Діаграми спрямованості густини потоку електромагнітного випромінювання від елементарного електричного випромінювача у ближній та проміжних зонах було побудовано,

підставляючи у формулу (12) значення густини потоків потужності за виразами (9)-(11) з урахуванням амплітудного значення (8), яке для випадку стандарту GSM-900 має чисельне значення $A_m = 875,6$ [мкВт/см²] та для випадку стандарту GSM-1800 має чисельне значення $A_m = 1592,1$ [мкВт/см²]. Результати математичного моделювання діаграм спрямованості густини потоку електромагнітного випромінювання від елементарного електричного випромінювача у ближній та проміжних зонах у меридіональній площині наведені на рис. 2 – рис. 3. Для стандарту GSM-900 зазначені відстані у сантиметрах складають такі значення електричної довжини: $kr = 0,5$ (а), $kr = 1,0$ (б), $kr = 1,5$ (в), $kr = 2,0$ (г), $kr = 3,0$ (д) і $kr = 10,0$ (е). Для стандарту GSM-1800 чисельні значення електричної довжини удвічі менші.

Як видно з рис. 2 і рис. 3 діаграми спрямованості густини потоку потужності електромагнітного випромінювання від елементарного електричного випромінювача у ближній та проміжних зонах у меридіональній площині мають вигляд відмінний від теоретичної форми (рис. 1,б). Для стандарту GSM-900 у ближній та проміжних зонах меридіональної площини діаграми спрямованості густини потоку потужності електромагнітного випромінювання від елементарного електричного випромінювача має «приплюснуту форму», що зумовлено «розщепленням» двох напрямів випромінювання у близькій та проміжній зонах випромінювання (рис. 2,а-д) до чотирьох напрямів випромінювання у проміжній зоні (рис. 2,е). Для стандарту GSM-1800 на зазначених довжинах у сантиметрах за рахунок удвічі меншої довжини хвилі не спостерігається яркого вираження чотирьох напрямів випромінювання (рис. 3,а-е).

Висновки. У роботі отримано нові результати математичного моделювання хвильових процесів при електромагнітному випромінюванні від елементарного електричного випромінювача у ближній та проміжних зонах. У ближній та проміжних зонах досліджено спрямовані властивості густини потоку потужності електромагнітного випромінювання при збудженні елементарного електричного випромінювача гармонійним сигналом зі сталою амплітудою та фазою. Форма діаграм спрямованості густини потоку електромагнітного випромінювання від елементарного електричного випромінювача у ближній та проміжних зонах відрізняється по формі від теоретичної. У ближній та проміжних зонах випромінювання від елементарного електричного випромінювача має місце «розщеплення» двох головних напрямів випромінювання у чотири

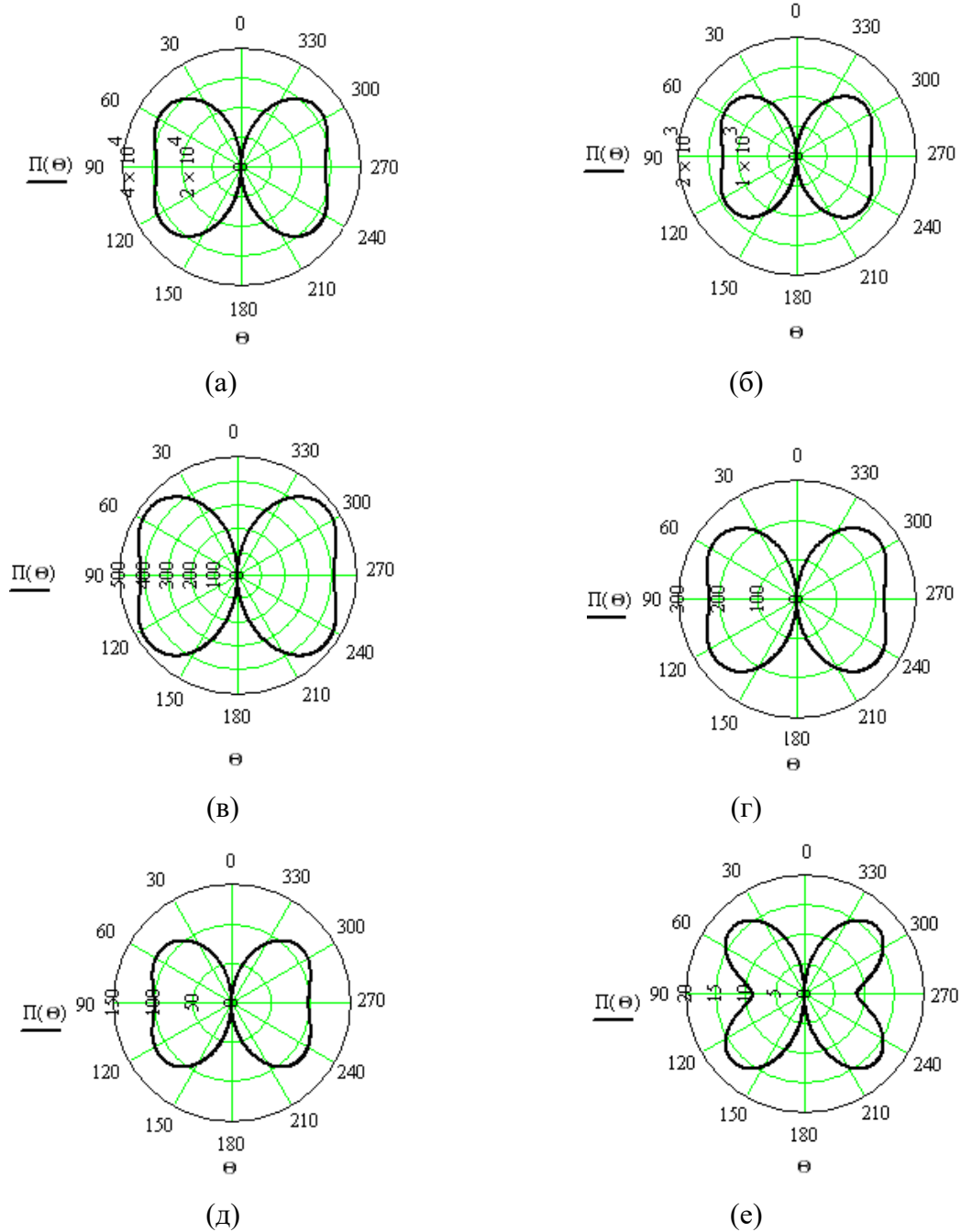


Рис. 2. Діаграми спрямованості густини потоку електромагнітного випромінювання від елементарного електричного випромінювача у ближній та проміжних зонах у меридіональній площині для стандарту GSM-900 при: $r = 2,5$ см (а), $r = 5,0$ см (б), $r = 7,5$ см (в), $r = 10$ см (г), $r = 15$ см (д) та $r = 50$ см (е)

напрями з поділом густини потужності електромагнітного випромінювання. Форма діаграми спрямованості густини потоку електромагнітного випромінювання від елементарного електричного випромінювача у проміжній зоні суттєво залежить від відстані до точки приймання. Отримані

в роботі результати є корисними при моніторингу стану електромагнітного випромінювання, а також для дослідження розподілу густини потоку електромагнітного випромінювання від елементарного електричного випромінювача при його збудженні багаточастотним сигналом.

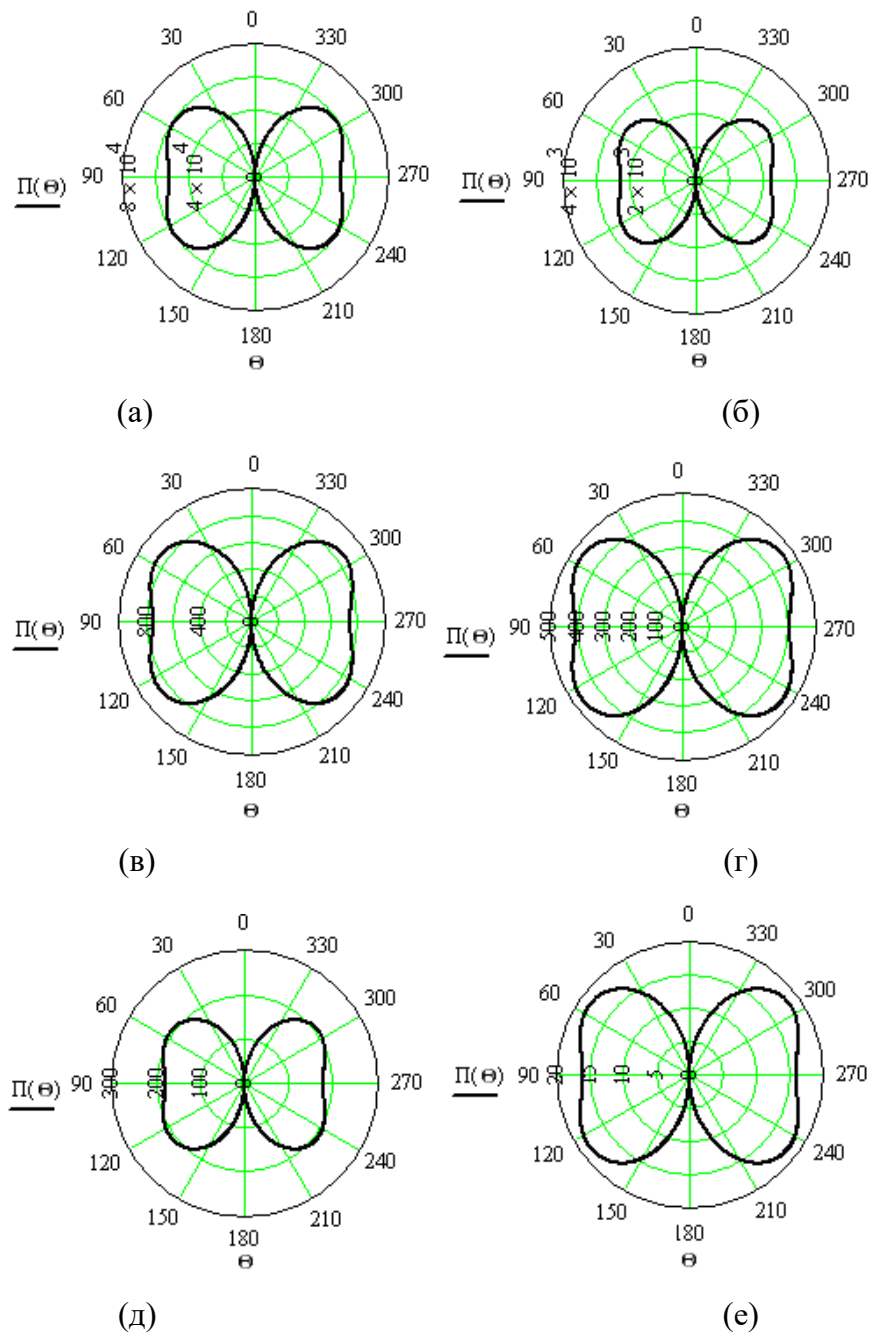


Рис. 3. Діаграми спрямованості густини потоку електромагнітного випромінювання від елементарного електричного випромінювача у ближній та проміжних зонах у меридіональній площині для стандарту GSM-1800 при: $r = 2,5$ см (а), $r = 5,0$ см (б), $r = 7,5$ см (в), $r = 10$ см (г), $r = 15$ см (д) та $r = 50$ см (е)

Список літератури:

1. A. Bulashenko, S. Piltyay, A. Polishchuk, O. Bulashenko. New Traffic Model of M2M Technology in 5G Wireless Sensor Networks. *2020 IEEE 2nd International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT)*, 25-27 Nov. 2020, Kyiv, Ukraine, pp. 125-131. DOI: 10.1109/ATIT50783.2020.9349305.
2. S. Piltyay, A. Bulashenko, I. Demchenko. Wireless Sensor Network Connectivity in Heterogeneous 5G Mobile Systems. *2020 IEEE International Conference on Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T)*, 6-9 Oct. 2020, Kharkiv, Ukraine, pp. 625-630. DOI: 10.1109/PICST51311.2020.9468073.
3. D. Makoveyenko, S. Siden, V. Pyliavskiyi. Generalized 5G mmWave Propagation Model in an Urban Macro Environment. *2020 IEEE International Conference on Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T)*, 6-9 Oct. 2020, Kharkiv, Ukraine, pp. 472-476, doi: 10.1109/PICST51311.2020.9468030.

4. D. Makoveyenko, O. Osharovska, S. Siden, V. Pyliavskiy. The Effect of Interference Evaluation Between LTE Mobile Stations and McWill Technology. *2020 IEEE International Conference on Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T)*, 6-9 Oct. 2020, Kharkiv, Ukraine, pp. 122-126, DOI: 10.1109/PICST51311.2020.9468080.
5. M. Shafi et al. 5G: A Tutorial Overview of Standards, Trials, Challenges, Deployment, and Practice. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2017, vol. 35, no. 6, pp. 1201-1221. DOI: 10.1109/JSAC.2017.2692307.
6. T. S. Rappaport, Y. Xing, G. R. MacCartney, A. F. Molisch, E. Mellios, J. Zhang. Overview of Millimeter Wave Communications for Fifth-Generation (5G) Wireless Networks—With a Focus on Propagation Models. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 65, no. 12, pp. 6213-6230, Dec. 2017. DOI: 10.1109/TAP.2017.2734243
7. A. Bulashenko, S. Piltyay, I. Demchenko, "Energy Efficiency of the D2D Direct Connection System in 5G Networks," *2020 IEEE International Conference on Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T)*, 6-9 Oct. 2020, Kharkiv, Ukraine, pp. 537-542. DOI: 10.1109/PICST51311.2020.9468035.
8. V. Saiko, S. Toliupa, V. Nakonechnyi, M. Brailovskyi. Models of Improving the Efficiency of Radio Communication Systems Using the Terahertz Range. *2020 IEEE International Conference on Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T)*, 6-9 Oct. 2020, Kharkiv, Ukraine, pp. 192-196. DOI: 10.1109/PICST51311.2020.9468022.
9. A. R. S. N. Dianah, R. Umar, M. K. A. Kamarudin, A. N. Dagang, S. N. Hazmin. Exposure level from selected base station tower around Kuala Nerus: A preliminary analysis. *Journal of Fundamental and Applied Sciences*, 2018, Vol. 9, Issue 5S, p. 367-380. African Journals Online (AJOL). DOI: 10.4314/jfas.v9i5s.26
10. T. S. Rappaport et al. Millimeter Wave Mobile Communications for 5G Cellular: It Will Work! *IEEE Access*, 2013, vol. 1, pp. 335-349. DOI: 10.1109/ACCESS.2013.2260813.
11. P. Popovski, K. F. Trillingsgaard, O. Simeone, G. Durisi. 5G Wireless Network Slicing for eMBB, URLLC, and mMTC: A Communication-Theoretic View. *IEEE Access*, 2018, vol. 6, pp. 55765-55779. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2872781.
12. Крушевський Ю. В., Кравцов Ю. І., Чернига В. В. Дослідження структури поля і спрямованості електричного елементарного випромінювача в ближній і проміжній зонах. *Наукові праці ВНТУ*, 2008, № 2. С. 1-9. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/62> (Доступ 27 квітня 2022 р.)
13. Крушевський Ю. В., Салямон О. М. Структура електромагнітних потоків елементарного електричного випромінювача в ближній і проміжній зонах. *Наукові праці ВНТУ*, 2008, № 3. С. 1-7. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/81> (Доступ 27 квітня 2022 р.)
14. Крушевський Ю. В., Кравцов Ю. І., Бородай Я.О. Вплив електромагнітного випромінювання пристроїв стільникового зв'язку на людину. *Наукові праці ВНТУ*, 2008, № 1. С. 1-6. Режим доступу: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/48> (Доступ 27 квітня 2022 р.)

Semenov A.O., Semenova O.O., Pinaiev B.O., Bilyk O.V., Shpylovyi O.O.

STUDY OF THE ELECTROMAGNETIC RADIATION FLUX DENSITY FROM AN ELEMENTARY ELECTRICAL EMITTER IN THE NEAR AND INTERMEDIATE ZONES

An elementary electric radiator is a fundamental element in technical electrodynamics and radio wave propagation theory. It is widely used as a separate source of electromagnetic radiation and a radiating component of complex antenna systems. An elementary electric emitter is used in all radio frequency spectra – at low frequencies, medium frequencies, high frequencies, and very high frequencies. This is due to the simplicity and ease of use. Therefore, an elementary electric emitter attracts much attention from researchers. There are many publications devoted to the study of wave phenomena in the isotropic propagation of radio waves. In these publications, physical effects and phenomena during the propagation of radio waves in the far zone of radiation are comprehensively investigated. Less attention was paid to studying the directional properties of an elementary electric radiator in the close and intermediate radiation zones. Researchers paid less attention to the study of the radiation power flux density in the near and intermediate radiation zone. The paper presents the results of a model study of the electromagnetic radiation flux density from an elementary electric emitter in the near and intermediate zones. A mathematical model is substantiated that describes the flux density of electromagnetic power radiation from an elementary radiator in the near and intermediate zones. The results of mathematical modeling are obtained. The directivity diagrams of the power flux density of electromagnetic radiation from an elementary emitter in the near and intermediate zones in the meridional plane for the GSM-900 and GSM-1800 standards are given. It has been established that in the intermediate zone of radiation of an elementary electric radiator, the radiation pattern differs in shape from the theoretical one. There is a splitting of the two main radiation directions into four directions with a separation of the power density of electromagnetic radiation.

Key words: electromagnetic radiation, flux density, radiation power, near zone, intermediate zone, radiation pattern.

ІНФОРМАТИКА, ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ

УДК 004.932.2

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.3/04>

Арпендій С.П.

Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз
Служби безпеки України

ТЕХНОЛОГІЯ ОПТИМАЛЬНОГО РОЗПОДІЛУ ШВИДКОСТЕЙ ТА ВІРТУАЛЬНИХ ОПОРНИХ КАДРІВ ДЛЯ ВИСОКОЕФЕКТИВНОГО КОДУВАННЯ ВІДЕО

Стандарт вискоефективного кодування відео (HEVC) зараз став найпопулярнішим рішенням кодування відео для відеоконференцій, трансляції та потокової передачі. Однак його продуктивність стиснення все ще є критичною проблемою для прийняття великої кількості нових відеопрограм з вищими просторовими та часовими роздільними можливостями. Щоб підвищити поточну продуктивність HEVC, в статті запропоноване ефективне рішення розподілу. Метою даної роботи є розробка простого, не стандартного інструменту кодування відео MPEG шляхом інтеграції рішення для створення віртуальної реальності в HEVC та уточнення існуючої схеми розподілу бітрейту. В роботі здійснено уникнення відомого підходу попереднього аналізу, який вимагає передбачити кілька кадрів або груп, що згодом створює значну складність і не підходить для ряду застосувань. Щоб досягти цієї мети пропонується підхід евристичного квантування. В загальному цей підхід зазвичай стикається з проблемою величезної обчислювальної складності кодування відео, різноманітних наборів даних, а також нелінійності процесу кодування. В запропонованій статті ці проблеми вирішені, використовуючи підхід динамічного програмування – розподіл ставок на основі решітки (TRA). Запропонований метод адаптивно розподіляє швидкість стиснення для кожного кодованого зображення в групі зображень за допомогою підходу динамічного програмування на основі решітки. Щоб досягти цього завдання в статті досліджені параметри квантування на основі решітки для кожного кадру в групі зображень з урахуванням положення тимчасового шару. Використане динамічне програмування на основі решітки для рекурсивного пошуку найкращого зміщення кожного тимчасового індексу (Tid). Для вивчення створення віртуальних опорних кадрів (VRF) у запропонованому HEVC, оцінено якість зображення та обчислювальна складність віртуальних опорних кадрів. Створення VRF, прийняте у статті, включає три основні кроки: ієрархічну оцінку руху (HME) для ініціалізації поля вектору руху; уточнення вектору руху (MVR) для зниження помилок квантування, які часто трапляються в декодованих посиланнях; компенсація руху для інтерполяції VRF. Одержані результати, отримані для широкого набору тестів, показали, що запропоновані рішення HEVC на основі TRA та VRF значно перевершують відповідні стандартні методи покращення HEVC.

Ключові слова: кодування відео, віртуальна реальність, евристичне квантування, динамічне програмування, віртуальні опорні кадри, тимчасовий індекс.

Постановка проблеми. Широке зростання мультимедійних додатків вимагає більш потужної передачі відео через Інтернет з високою продуктивністю стиснення та низькою складністю. Тому в даний час вже впроваджено вискоефективне кодування відео (в подальшому – HEVC – High Performance Video Encoding) зі зниженням бітрейту на 50 % при тій же якості сприйняття, що й попередній стандарт H.264/AVC [1]. Незва-

жаючи на це існує подальший попит на кодування за межами HEVC, щоб задовольняти все нові вимоги вищої роздільної здатності (наприклад, 4K, 8K) і різноманітного вмісту. У цьому контексті в новітньому стандарті стиснення відео H.266 / Versatile Video Coding (в подальшому – VVC), було запропоновано багато інструментів кодування, таких як розділення за допомогою quad-tree та двійкові адаптивні перетворення, нові

внутрішні режими, афінна оцінка руху, залежне квантування тощо [2]. Методи оцінки афінного руху, віртуальна система відліку та контроль тимчасової швидкості є активними темами дослідження для покращення продуктивності міжкодування. При цьому найвище зниження бітрейту забезпечують інструменти інтеркодування, а їхнє дослідження та застосування є актуальною проблемою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Контроль швидкості є одним із найпотужніших інструментів кодування для підвищення швидкості спотворення (в подальшому – RD – rate distortion) будь-якого відекодека. Загалом, при заданій якості, ставки розподіляються від грубої до тонкої (I) в групі зображень (в подальшому – GOP – group of pictures) або тимчасовому розподілі швидкості, потім (II) розподіляються між одиницями кодування, або (III) адаптивним розподілом [3].

Адаптивні підходи є складними і вимагають складності обчислень і пам'яті для попереднього або онлайн-аналізу. В результаті загальна умова тестування найновіших стандартів кодування відео, включаючи H.266/VVC, все ще сприяє простому ієрархічному розподілу швидкості на рівні кадру [4]. Однак із зростанням конкуренції з боку Media Video Coding (AV1) з адаптивним GOP, потрібне ефективне розподілення тимчасової швидкості для кодеків MPEG. HEVC приймає простий тимчасовий контроль швидкості через свою ієрархічну структуру кодування [5].

Однак простий метод у HEVC є не завжди ефективний. У роботі [6] запроваджено адаптивне розподілення бітрейту для кожного кадру за схемою, оптимізованою для швидкості. Однак ці методи вимагали модифікації декодера, який не відповідає стандарту HEVC.

Віртуальний опорний кадр (в подальшому – VRF – Virtual reference frame) є іншим підходом покращення міжкодування шляхом (I) генерування віртуальних кадрів і (II) використання віртуальних кадрів для керування реконструйованих кадрів [7]. У кількох роботах використовувалася оцінка руху або розширена структура глибокого навчання для інтерполяції із декодованих кадрів [8].

Підхід глибокого навчання показує більший приріст, але також вносить величезну складність як в кодері, так і в декодері [9, 10]. Для HEVC був запропонований алгоритм раннього контролю швидкості з використанням моделі уніфікованої швидкості квантування (R-Q – rate-quantization) по пікселям [11]. Ця модель R-Q майже така ж, як і звичайна квадратична модель R-D. Пізніше Лі та ін. у роботі [12], запропонували R-модель,

з множником Лагранжа на основі складності кадру. Цей алгоритм управління швидкістю розподіляє цільові біти для групи, кадру або STU. Подальше розширюючи цю роботу, автори в [13] запропонували R-модель на основі градієнта та керування частотою між кадрами для HEVC.

Щоб покращити деталізацію обличчя для відеоконференцій із кодуванням, група науковців у роботі [14] розробила алгоритм керування швидкістю на основі R-моделі, яка може виділити більше цільових бітів у відеокадрі. З огляду на продуктивність внутрішнього кодування, для оптимізації розподілу бітів на рівні STU був запропонований у [15] підхід теорії ігор на основі подібності структури (SSIM – structure similarity).

Аналогічно, розподіл бітів і алгоритми керування швидкістю були запропоновані в [16] для оптимізації розподілу бітів для ключових кадрів. В [17] автори представили паралельну апаратну архітектуру для оцінки швидкості у внутрішньому кодуванні HEVC. Хоча вищезгадані алгоритми контролю швидкості [18] показують багатообіцяючу продуктивність для HEVC, але їхня висока обчислювальна складність може не підходити для низки нових відеододатків.

Формулювання цілей статті. Хоча метод на основі віртуальних посилок забезпечив важливе покращення стиснення для HEVC, все ще є простір для подальшого покращення продуктивності HEVC. Попередні роботи досліджували віртуальну систему відліку або тимчасовий контроль швидкості окремо. По-перше, попереднє створення VR, в основному, покладалося на підхід на основі оцінки руху та інтерполяції, який може бути неефективним для вмісту швидкого руху та стиснутий з високими QR або низькою швидкістю. По-друге, попередні кадри VR використовуються для всіх V-зрізів, що завжди може бути ефективним з точки зору оптимізації швидкості викривлення (в подальшому – RDO – rate-distortion optimization), особливо для зображень у позиціях низького тимчасового шару. Нарешті, оскільки якість кадрів VR сильно залежить від якості існуючих декодованих посилок, адаптивні квантовані кадри на різних рівнях впливатимуть на продуктивність міжкодування. У цьому контексті в цій статті пропонується:

1. створення нового віртуального опорного кадру, в якому для генерації використовується метод оцінки руху з множинними гіпотезами;

2. ефективний алгоритм розподілу швидкості, в якому метод решіткового кодування використовується для вивчення тимчасового розподілу швидкості.

Тому метою даної роботи є розробити простий, не стандартний інструмент кодування відео MPEG шляхом інтеграції рішення для створення віртуальної реальності в HEVC та уточнення існуючої схеми розподілу бітрейту. В запропонованій роботі автор уникнув відомого підходу попереднього аналізу, який вимагає передбачити кілька кадрів або групових груп, що згодом створює значну складність і не підходить для ряду застосувань. Щоб досягти цієї мети, автор запропонував підхід евристичного квантування. В загальному підхід до навчання зазвичай стикається з проблемою величезної обчислювальної складності кодування відео, різноманітних наборів даних, а також нелінійності процесу кодування [19]. Автор вирішив ці проблеми, використовуючи підхід динамічного програмування – розподіл ставок на основі решітки (TRA).

Виклад основного матеріалу дослідження. Інтеркодування HEVC

У порівнянні з попередніми інструментами міжкодування стандарту H.264/AVC [20], HEVC вносить кілька покращень у інструменти кодування та структуру кодування, зокрема (I) розбиття блоків та (II) оцінку руху та керування опорним зображенням. HEVC прийняв інструменти міжкодування, щоб скористатися перевагами тимчасової кореляції між кадрами в GOP. У цьому інструменті представлено нове розподілення тимчасової швидкості та використання віртуального опорного кадру для міжкодування HEVC. Отже, опишемо базовий інструмент з інтеркодування HEVC, а далі проаналізуємо керування швидкістю HEVC. Міжкодування HEVC дозволяє стискати зображення з більшою кількістю форм блочних розділів, ніж внутрішнє кодування, зокрема, режими розділу PART 2N 2N, PART 2N N і PART

N 2N вказують на випадки, коли блок кодування не розділений та розділений на два блоки рівного розміру по горизонталі та вертикалі відповідно. Хоча PART N N відноситься до випадку, коли блок кодування розбивається на чотири блоки однакового розміру. Крім того, є чотири асиметричні розділи руху: PART 2N nU, PART 2N nD, PART nL 2N і PART nR 2N (рис. 1). Для кожної одиниці дерева кодування (CTU – coding tree unit) процес оптимізації швидкості спотворення RDO обчислюється, щоб знайти оптимальну одиницю кодування та прогнозування, зокрема від 64 x 64 до 8 x 8.

Оцінка руху та керування опорним зображенням: подібно до попереднього стандарту кодування відео, HEVC використовує оцінку руху, щоб знайти найкращий відповідний блок в опорних кадрах, щоб зменшити надмірність між послідовними кадрами. Для керування опорним зображенням HEVC зберігає попередньо декодовані зображення в буфері декодованого зображення (DPB – decoded picture buffer). Щоб ідентифікувати ці зображення, список ідентифікаторів кількості зображень (POC – picture order count) передається в кожному заголовку фрагмента, а набір зображень називається набором опорних зображень (RPS – reference picture set), як показано на рис. 2.

HEVC DPB також містить два списки, список 0 і список 1, на які посилаються через індекс опорного зображення. Для подвійного прогнозування, тобто в конфігурації кодування з довільним доступом, вибираються два зображення (по одному з кожного списку).

Контроль швидкості HEVC

Контроль швидкості був важливою темою дослідження в кодуванні відео протягом багатьох років. Часовий домен є ефективним способом зниження швидкості переходу. HEVC викорис-

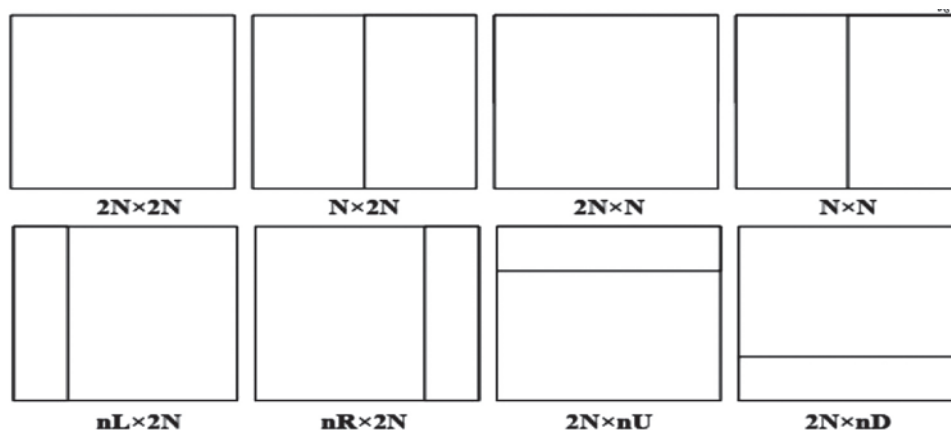


Рис. 1. Ілюстрація блочних розділів у міжкодуванні HEVC

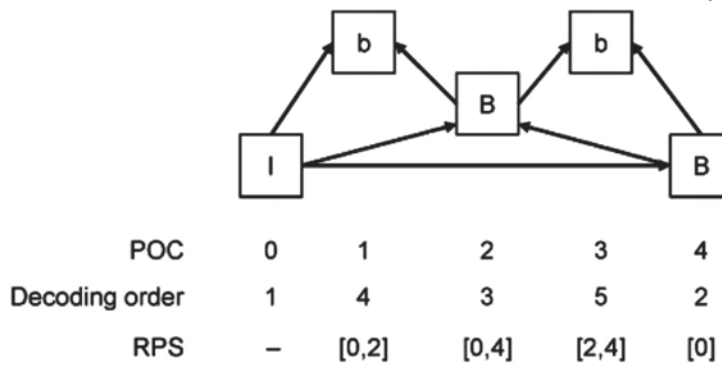


Рис. 2. Приклад структури в інтеркодуванні HEVC

товує фіксований ієрархічний розподіл бітової швидкості. Він керує бітами для кожного кадру в групі зображень GOP з тимчасовим індексом Tіd, пов'язаним з його ієрархічною опорною моделлю. За допомогою простого налаштування параметрів QP для кожного кадру, кадри з високим рівнем Tіd кодуються на вищий параметр квантування QP. Однак цей простий метод у HEVC не в змозі запобігти спотворенню. Тому для стандартів кодування відео були розроблені різні алгоритми контролю швидкості.

У цій роботі увага зосереджена на розробці алгоритму керування частотою кадрів. Для цього потрібні навчальні дані, щоб мати необроблений відеовміст різних розмірів і роздільної здатності. Таким чином, використання нещодавно вдосконалених платформ, таких як глибоке навчання [21], вимагало б функцій для кількох кадрів у кожній групі GOP, що вимагає величезної кількості обчислень не тільки під час навчання, але й під час розгортання. Крім того, структура навчання часто покладається на такі показники якості, як MSE, які погано відображають загальноприйнятую оцінку BDBR при розробці кодеків. В результаті, з обмеженими обчислювальними ресурсами, не можливо використовувати більш дешевий алгоритм навчання. Щоб вирішити цю проблему, запропоновано просте, але ефективне рішення розподілу тимчасової швидкості для HEVC, заснованого на використанні решітки.

Запропонований алгоритм TRA був інтегрований як в оригінальний HEVC, так і в HEVC з віртуальними системами відліку (VRF). Отже, у цьому розділі представлено новий HEVC з віртуальною системою відліку, за яким слідує запропоноване рішення TRA.

Пропонована архітектура

Запропонована архітектура кодування HEVC працює з виділеними модифікованими модулями.

Віртуальні опорні кадри генеруються з опорних декодованих кадрів на основі оцінки руху множин і потім передаються в DPB. Як раніше декодовані посилання, так і віртуальні посилання використовуються як опорні для оцінки руху поточного кадру.

Щоб досягти високоефективного кодера, автор створив новий віртуальний опорний кадр для кодування на основі ієрархічної оцінки руху (HME – hierarchical motion estimation) та методики компенсації. Щоб повністю використовувати статистичну інформацію з декодованих даних і кореляцію текстури між двома послідовними посиланнями, автор також пропонує вдосконалену тимчасову інтерполяцію з компенсацією руху (MCTI – motion-compensated temporal interpolation), засновану на створенні кадру VR, в якому поле вектору руху адаптивно генерується з використанням ієрархічної оцінки руху (ME – motion estimation) з блоком розміром 16 × 16 або 32 × 32. На цьому етапі була прийнята мінімізація середньої абсолютної різниці (RMAD – regularized mean absolute difference).

Оскільки великому розміру блоку важко охопити інформацію про рух малої активності або відео, знятого з віддаленої камери, можна вибрати більш тонкий розмір блоку. Після цього для уточнення поля руху треба прийняти уточнення вектору руху. Далі компенсація руху використовується для створення кадру VR. Створення кадру VR може бути виконано наступним чином. По перше, декодовані кадри, отримані з двох списків посилань (списку 0 і списку 1) фільтруються низькими частотами і використовуються як посилання в процесі оцінки руху. Запропоноване створення кадру VR використовує застосування прямого інтерпольованого кадру та зворотного інтерпольованого кадру. У цих модулях алгоритм узгодження блоків використовується для оцінки

руху між наступним і попереднім декодованими кадрами.

Використання віртуальної опорної рамки

Щоб отримати більш точну інформацію про вектор руху, треба виконати поле вектору руху (MVF – motion vector field). Щоб спростити проблему, необхідно підвищили вибірку опорних систем у 2 рази, як у горизонтальному, так і у вертикальному напрямках, як показано на рис. 3. Після підвищення вибірки MVF уточняється з урахуванням його 8 сусідніх MV.

Уточнення MV: для досягнення кращого поля руху використовується процес уточнення вектору руху (MVR – motion vector refinement). У MVR тимчасова двунправлена МЕ (BiME) і просторова зважена векторна медіана фільтрація (WVMF – weighted vector median filtering) вибираються для уточнення інформації про рух, отриманої з ієрархічного етапу МЕ. У BiME вектори руху кожного інтерпольованого блоку уточнюються в невеликій області пошуку з урахуванням припущення, що траєкторія руху між послідовними кадрами є лінійною. У той час як просторовий WVMF покращує просторово когерентне поле руху, шукаючи для кожного інтерпольованого блоку поле в сусідніх блоках, що може краще відображати траєкторію руху. Цей фільтр також регулюється керуючи його потужністю та залежно від спотворення блоку для кожного вектору руху. Оскільки якість декодованих посилань і відео-контенту сильно впливає на кінцеву якість кадру VR, автором прийнято рішення для оптимізації параметрів на основі статистичного навчання для ініціалізації розміру блоку, діапазону пошуку та областей уточнення пошуку для запропонованого методу МСТІ. Компенсація руху: процес компенсації руху застосовується до декодованих кадрів MV для досягнення кадрів VR.

Щоб краще використовувати цей новий метод, автор виконав ряд експериментів, щоб визначити, яке положення кадру слід використовувати для створення кадрів VR. Створення кадру VR має переваги від низької складності оцінки руху та підходу до компенсації в поєднанні з оптимальною конфігурацією параметрів.

Розподіл швидкості на основі решітки TRA

Пошук решітки забезпечується алгоритмом динамічного програмування для пошуку оптимальної кодової послідовності. У кодуванні відео решітковий пошук використовується в оптимізованому квантуванні швидкості HEVC. Починаючи з початкового квантування (тобто x), RDOQ рекурсивно вирішує оптимальний рівень квантування в кожному місці розташування коефіцієнта між x та $x-1$ з метою мінімізації швидкості та вартості спотворення.

Автором змодельований розподіл бітрейту як оптимальний шлях пошуку коригування QP між тимчасовими ідентифікаторами Tid (див. рис. 4).

Далі виконується ітераційний пошук з максимальними фазами K . На кожній фазі шукаються оптимальні зміщення QP, починаючи від Tid 0 до Tid 3 щодо найкращого зменшення BDBR. Починаючи від найбільшого Tid 0 до найменшого Tid 3, уникаємо великих коливань в алгоритмі (тобто посилення BDBR має тенденцію зменшуватися після кожного кроку). Приклад структури Tid у HEVC показаний на рис. 4. Чим нижчий Tid, тим він важливіший, оскільки більше зображення має значення при нижчому Tid. У своїй практиці автор використовував тільки двофазний $K = 2$. Найкраще зміщення QP на ітерації k , і Tid_i (тобто позначений як DQP_k) додається до оптимального списку DQP_k з повного списку $\{0, \pm 1, \dots, \pm k\}$, які вже видалили з попередньої ітерації (тобто

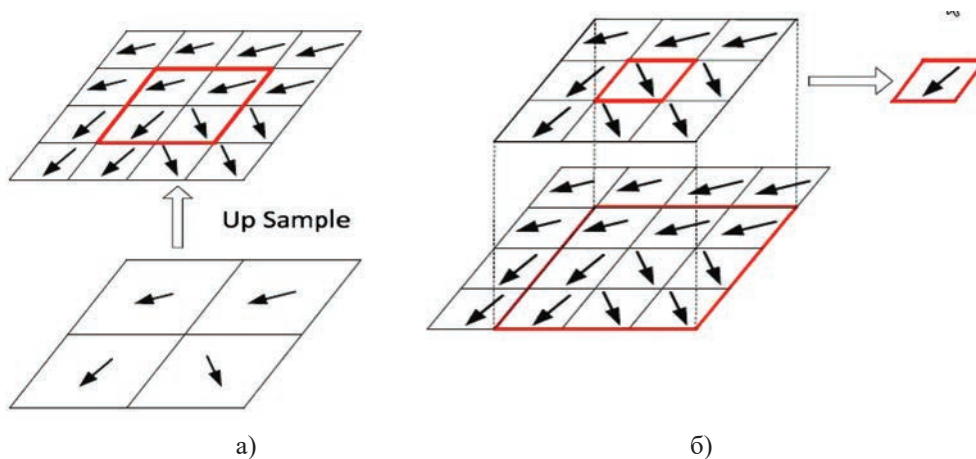


Рис. 3. Ієрархія МЕ: вибірка MVF (а); вибірка MV (б)

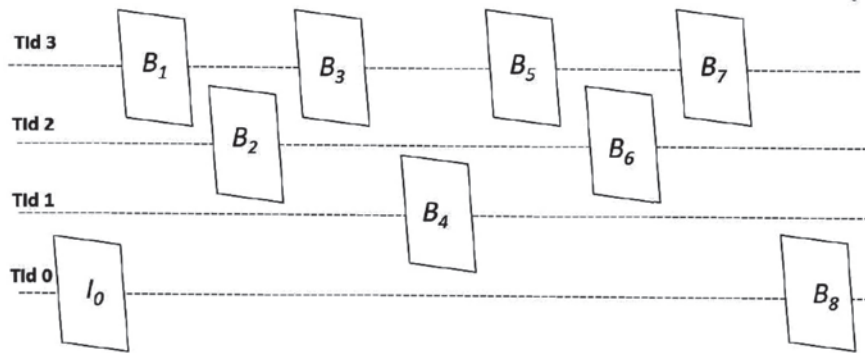


Рис. 4. Конфігурація довільного доступу HEVC

DQPk-1i). Для обмеження складності в цій роботі було встановлено максимальний діапазон зміщення k. На основі швидкості скорочення бітрейту (BDBR – Based on the bitrate reduction) даного набору відеоданих були обрані найкраще зміщення для сценаріїв високого та низького бітрейту. Враховуючи чотири Tids, у максимальному діапазоні 2 (тому, п'ять доступних варіантів), з шістьма QP для низької та високої швидкості, кількість тестів для кожної послідовності пошуку становить

$$nQP \times r^4 = 6 \times 5^4 = 3750. \quad (1)$$

Це все ще вимагає значної кількості обчислень. Тому автор використовував динамічне програмування на основі решітки для рекурсивного пошуку найкращого зміщення кожного Tid. Для одноетапного раунду пошуку (фази) він вимагає

$$nQP \times (5 + 4 + 4 + 4) = 6 \times 17 = 102, \quad (2)$$

для кожної послідовності, що значно зменшує кількість симуляцій. Незважаючи на те, що запропонований TRA може значно скоротити простір для пошуку, він все одно вимагає величезних обчислень, враховуючи численні тестові послідовності та кілька ітерацій. Тому автор пропонує спрощену версію TRA з двофазним ітеративним підходом. На першому етапі здійснено обмеження до $\{0, \pm 1\}$, що вимагає

$$nQP \times (3 + 2 + 2 + 2) = 6 \times 9 = 54, \quad (3)$$

проведення половини експериментів як у TRA. На другому етапі протестоване лише додаткову конфігурацію, яка становить ± 1 від фази 1. Якщо оптимальне зміщення дорівнює +1, тоді оцінюється тільки етапі 1. Отже, максимальна кількість додаткових експериментів за ітерацію дорівнює

$$nQP \times (1 + 1 + 1 + 1) = 6 \times 4 = 24. \quad (4)$$

Комбінація експериментів у (3) і (4) значно менша, ніж вихідна TRA в (2).

Для навчання TRA було прийнято рішення налаштувати рівень квантування або DQP на кожному Tid, пов'язаному з продуктивністю RD цілих послідовностей. Далі застосовано зміщення TRA до тестових послідовностей без тонкого налаштування, щоб уникнути додаткових витрат на складність. Таким чином, встановлюємо залежну групу квантування $DQP_i, i = 0, 1, 2, 3$.

Умови та оцінки тестування

Для оцінки ефективності кодування запропонованих методів Y-BDBR розраховується за конфігурацією довільного доступу (RA – Random Access) за загальних умов тестування. Автор використовував НМ 16.20 з GOP 8, внутрішнім періодом 32 і різними параметрами квантування для високої швидкості (QP: 22, 27, 32, 37), що відповідає загальній умові тесту в HEVC і низькій швидкості (QP: 32, 37, 42, 45). Для розподілу швидкості на основі решітки було обрано 16 послідовностей з різними роздільними можливостями та частотою кадрів, тоді як тестові послідовності є іншими поширеними послідовностями в HEVC [22]. Лише перші 64 кадри використовуються для скорочення часу навчання, але все одно забезпечують високу продуктивність.

Рис. 5 і 6 ілюструють перший кадр кожної відео-послідовності, а послідовності навчання та тестування можна побачити в табл. 1. Легко помітити, що TRA вже досягає хорошої продуктивності навіть на першій фазі, яка включає набір DQP $\{\pm 1, 0\}$. Більше того, однієї ітерації достатньо, щоб TRA зблизився в обох фазах. Для навчального набору 1080p на фазі 1 додатковий набір DQP $\{\pm 2, \pm 1, 0\}$ у фазі 2 не показав покращення BDBR для TRA. Причина відсутності покращення TRA на фазі 2 пов'язана зі зміною DQP на рівні кадру, що істотно вплине на загальну продуктивність. Тому ± 2 може занадто значно відрізнятись від звичайної ставки. Однак у поєднанні з VRF DQP 2 показав значний

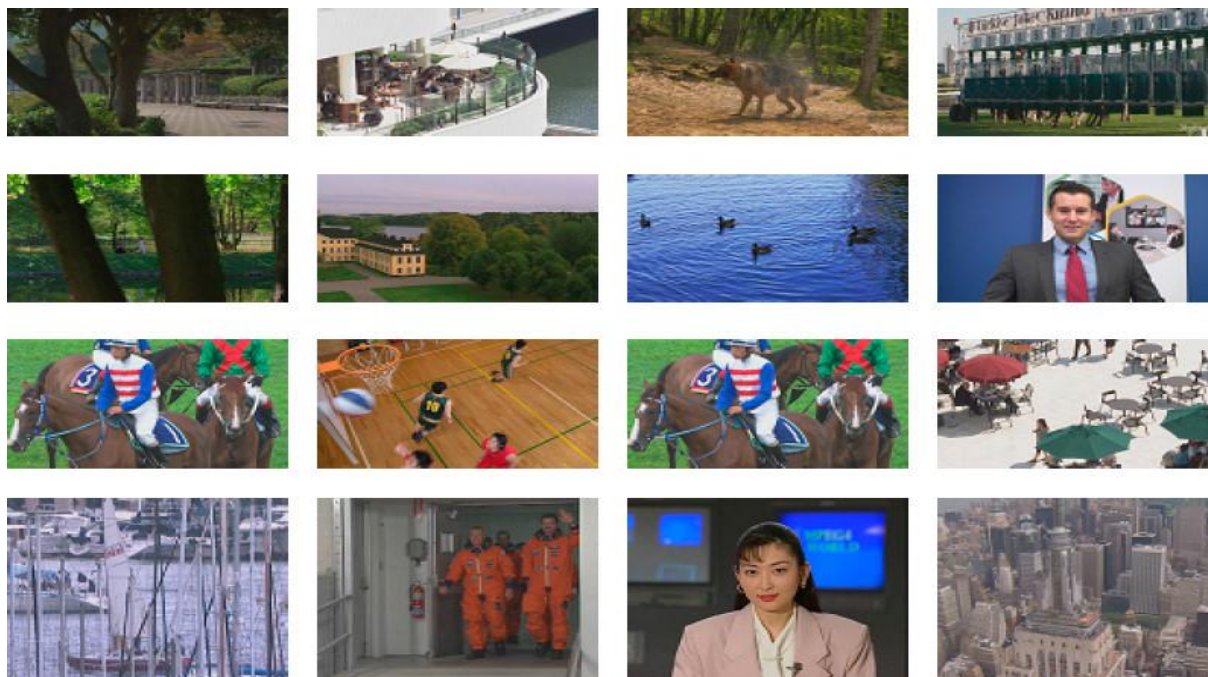


Рис. 5. Ілюстрація першого кадру навчального відео.

Зліва направо, зверху вниз: Park, Terrace, SnakeDry, ReadySteady, Parkjoy, InTree, DucksTake, Man, Horses, Basketball, Crew, Harbour, Race, Square, Woman, City.

приріст у середньому на 1 % BDBR у навчальному наборі.

Втрата якості на низькому рівні компенсується додатковими віртуальними кадрами. З'ясовано, що використання одного і того ж набору DQP для всіх навчальних даних демонструє незначне покращення якості з високою швидкістю. Це пов'язано з природою локального оптимуму динамічного програмування. При низькій швидкості додаткові 0,31 % Y-BDBR досягаються для низької швидкості, але майже ідентичні результати для високої. Тому автором прийнято простий адаптивний вибір DQP на основі роздільної здатності. Оскільки роздільна здатність доступна як вхідні дані, запропонований метод не вимагає додаткової складності порівняно з іншими фреймворками. Для складних адаптивних методів (наприклад, швидкий / повільний рух, проста / деталізована сцена тощо) це може бути цікавою темою для майбутніх робіт.

Оцінка продуктивності стиснення. Ефективність кодування тестових послідовностей оцінюється для BDBR і для порівняння BDPSNR. Автор порівняв запропонований метод TRA з VRF і без нього з HEVC з (TRA) і без VRF (TRA + VRF), найбільш релевантним методом адаптивного квантування, а також стандартним методом HEVC. Подібно до навчального набору, для порівняння використовуються низькошвидкісні та високошвидкісні BDBR.

Загалом, як TRA, так і VRF забезпечують послідовне покращення порівняно з базовим HEVC.

В основному це відбувається завдяки створенню додаткових посилок. Збільшення опорних кадрів також призводить до більшого часу кодування для оцінки руху. Цей компроміс між складністю та продуктивністю стиснення може запобігти широкому розгортанню VRF в деяких програмах кодування відео, де обчислювальна складність обмежена. Крім того, проблему складності в VRF можна вирішити шляхом пошуку методів створення VRF низької складності.

Оцінка складності. Хоча VRF продемонстрував високу продуктивність стиснення, коли він був прийнятий в архітектуру HEVC, він також вніс значну складність накладних витрат. Для подальшого вивчення створення VRF у запропонованому HEVC, у цьому пункті буде оцінено якість зображення та обчислювальна складність VRF.

Як показано у статті вище, створення VRF, прийняте в цій статті, включає три основні кроки: (I) ієрархічна оцінка руху HME для ініціалізації поля вектору руху, (II) уточнення вектору руху MVR для пом'якшення помилки квантування, які часто трапляються в декодованих посиленнях, і (III) компенсація руху MC для інтерполяції VRF. Щоб виявити внесок цих модулів, обчислимо та проілюструємо в таблиці 2 відсоток часу обчислень (%), вимірний для VRF щодо загального HEVC

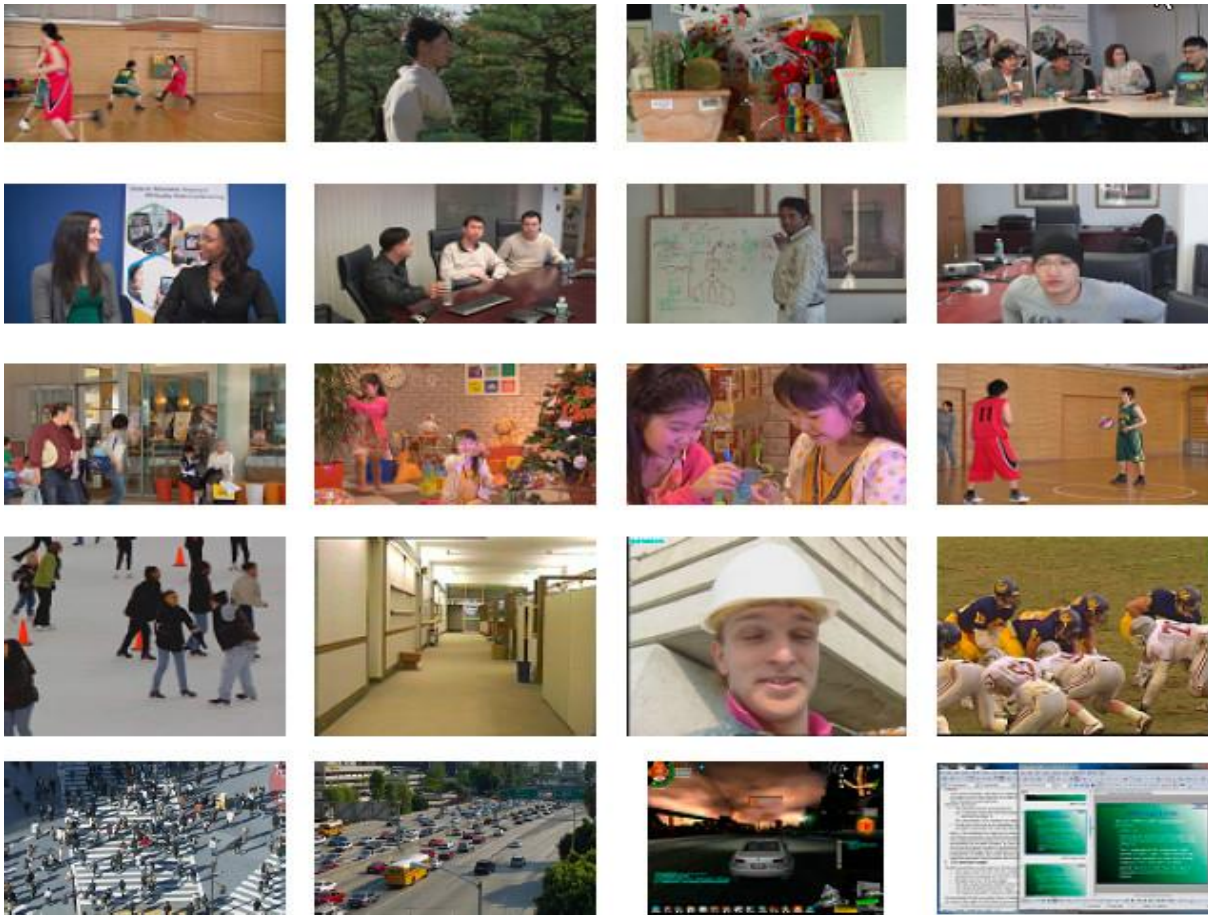


Рис. 6. Ілюстрація першого кадру тестового відео

Зліва направо, зверху вниз: BasketDrive, Kimono, Cactus, People, KristenSara, Vidio1, Vidio3, Vidio4, Mall, Party, Ice, BasketPass, Blowing, Hall, Foreman, Football, PeopleStreet, Traffic, Speed, SlideEditing

Таблиця 1

Послідовності навчання та тестування з різними роздільною здатністю та частотою кадрів

| Роздільна здатність | Навчальний відеоряд (рис. 6) | Тестовий відеоряд (рис. 7) |
|---------------------|--------------------------------------|--|
| 1080p and Class A | Park, Terrace, SnakeDry, ReadySteady | BasketDrive, Kimono, Cactus |
| 720p and Class | ParkJoy, InTree, DucksTake, Man | KristenSara, Vidio1, Vidio3, Vidio4, Speed, SlideEditing |
| 480p | RaceHorses, BasketballDrill | Mall, Party |
| 4SIF | Crew, Harbour | Ice |
| 240p | Race, Square | BasketPass, Blowing |
| CIF | Woman, City | Hall |

(VRFHEVC), а також для HME, MVR та Mcover VRF (HMEVRF, MVRRF, MCVRF).

$$VRF^{HEVC} = Time^{VRF} \times 100 / Time^{HEVC}, \quad (5)$$

$$HME^{VRF} = Time^{HME} \times 100 / Time^{VRF}, \quad (6)$$

$$MVR^{VRF} = Time^{MVR} \times 100 / Time^{VRF}, \quad (7)$$

$$MC^{VRF} = Time^{MC} \times 100 / Time^{VRF}. \quad (8)$$

Результати складності, отримані в таблиці 2 показують, що VRF споживає близько 11,70 %

обчислювальної складності в загальному кодуванні HEVC. У VRF HME потребував найбільшої обчислювальної складності, тобто 95,24 %. У цьому випадку скорочення часу HME має вирішальне значення.

Висновки. Ця стаття є піонерською роботою, яка розглядає вплив помилки квантування та відеоконтенту на якість кадрів.

У запропонованій роботі був представлений новий алгоритм розподілу бітрейту на основі

Оцінка складності VRF

| Video | VRF _{HEVC} | HME _{VRF} | MVR _{VRF} | MC _{VRF} |
|-----------------|---------------------|--------------------|--------------------|-------------------|
| BasketballDrive | 12.71 | 96.06 | 2.37 | 1.56 |
| Kimono | 12.41 | 96.09 | 2.38 | 1.53 |
| Cactus | 14.12 | 96.03 | 2.37 | 1.59 |
| PeopleOnStreet | 14.17 | 96.85 | 1.87 | 1.28 |
| Traffic | 18.47 | 96.81 | 1.86 | 1.33 |
| FourPeople | 13.70 | 95.21 | 2.85 | 1.94 |
| KristenAndSara | 12.71 | 96.06 | 2.37 | 1.56 |
| Vidio1 | 13.72 | 95.22 | 2.82 | 1.96 |
| Vidio3 | 13.15 | 95.26 | 2.82 | 1.93 |
| Vidio4 | 13.24 | 95.24 | 2.85 | 1.91 |

решітки для міжкодування HEVC, де розглядається віртуальний опорний кадр. Запропонований метод VRF-HEVC спирається на декодовану інформацію, доступну як в кодері, так і в декодері; таким чином, не потрібно змінювати елементи синтаксису в стандартній специфікації, а також бітрейту.

Було виконано значну кількість експериментів із численними відеозаписами тестів, які продемонстрували збільшення швидкості BD приблизно на 25 % на основі останнього еталонного програмного забезпечення HEVC. Щоб оптимізувати якість

VRF, розроблено створення кадру VRF на основі статистичного навчання. Крім того, для досягнення вищої продуктивності стиснення HEVC, новий набір параметрів квантування введено для структури VRF-HEVC на основі підходу розподілу бітрейту шляхом динамічного програмування.

Одержані результати, отримані для широкого набору тестів показали, що запропоновані рішення HEVC на основі TRA та VRF значно перевершують відповідні стандартні методи покращення HEVC.

Список літератури:

- Enhanced Motion-Compensated Video Coding With Deep Virtual Reference Frame Generation / L. Zhao et al. *IEEE Transactions on Image Processing*. 2019. Vol. 28, no. 10. P. 4832–4844. URL: <https://doi.org/10.1109/tip.2019.2913545> (date of access: 25.04.2022).
- Neural Inter-Frame Compression for Video Coding / A. Djelouah et al. *2019 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV)*, Seoul, Korea (South), 27 October – 2 November 2019. 2019. URL: <https://doi.org/10.1109/iccv.2019.00652> (date of access: 25.04.2022).
- QP refinement according to Lagrange multiplier for High Efficiency Video Coding / Bin Li et al. *2013 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, Beijing, 19–23 May 2013. 2013. URL: <https://doi.org/10.1109/iscas.2013.6571884> (date of access: 25.04.2022).
- A Novel Rate Control Algorithm Based on ρ Model for Multiview High Efficiency Video Coding / T. Yan et al. *Electronics*. 2020. Vol. 9, no. 1. P. 166. URL: <https://doi.org/10.3390/electronics9010166> (date of access: 25.04.2022).
- HoangVan X. Adaptive Quantization Parameter Estimation for HEVC Based Surveillance Scalable Video Coding. *Electronics*. 2020. Vol. 9, no. 6. P. 915. URL: <https://doi.org/10.3390/electronics9060915> (date of access: 25.04.2022).
- An adaptive QP offset determination method for HEVC / M. A. Papadopoulos et al. *2016 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, Phoenix, AZ, USA, 25–28 September 2016. 2016. URL: <https://doi.org/10.1109/icip.2016.7533155> (date of access: 25.04.2022).
- Rate distortion modeling and adaptive rate control scheme for high efficiency video coding (HEVC) / L. Sun et al. *2014 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, Melbourne VIC, Australia, 1–5 June 2014. 2014. URL: <https://doi.org/10.1109/iscas.2014.6865539> (date of access: 25.04.2022).
- Xu M., Nguyen Canh T., Jeon B. Simplified Level Estimation for Rate-Distortion Optimized Quantization of HEVC. *IEEE Transactions on Broadcasting*. 2020. Vol. 66, no. 1. P. 88–99. URL: <https://doi.org/10.1109/tbc.2019.2941063> (date of access: 25.04.2022).
- SSIM-Based Game Theory Approach for Rate-Distortion Optimized Intra Frame CTU-Level Bit Allocation / W. Gao et al. *IEEE Transactions on Multimedia*. 2016. Vol. 18, no. 6. P. 988–999. URL: <https://doi.org/10.1109/tmm.2016.2535254> (date of access: 25.04.2022).

10. Zhang Y., Lu C. A Highly Parallel Hardware Architecture of Table-Based CABAC Bit Rate Estimator in an HEVC Intra Encoder. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*. 2019. Vol. 29, no. 5. P. 1544–1558. URL: <https://doi.org/10.1109/tcsvt.2018.2830126> (date of access: 25.04.2022).
11. Hoang Van X. Statistical search range adaptation solution for effective frame rate up-conversion. *IET Image Processing*. 2018. Vol. 12, no. 1. P. 113–120. URL: <https://doi.org/10.1049/iet-ipr.2016.0938> (date of access: 25.04.2022).
12. Bossen F. Common HM Test Conditions and Software Reference Configuration. In Proceedings of the 14th meeting of the Joint Collaborative Team on Video Coding (JCT-VC), Vienna, Austria, 25 July–2 August 2013. URL: [https://www.scirp.org/\(S\(i43dyn45teexjx455qlt3d2q\)\)/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=2150073](https://www.scirp.org/(S(i43dyn45teexjx455qlt3d2q))/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=2150073) (date of access: 25.04.2022).
13. Enhanced Ctu-Level Inter Prediction with Deep Frame Rate Up-Conversion for High Efficiency Video Coding / L. Zhao et al. *2018 25th IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, Athens, 7–10 October 2018. 2018. URL: <https://doi.org/10.1109/icip.2018.8451465> (date of access: 25.04.2022).
14. Wang M., Ngan K. N., Li H. An Efficient Frame-Content Based Intra Frame Rate Control for High Efficiency Video Coding. *IEEE Signal Processing Letters*. 2015. Vol. 22, no. 7. P. 896–900. URL: <https://doi.org/10.1109/lsp.2014.2377032> (date of access: 25.04.2022).
15. Seong-Gyun Jeong, Chul Lee, Chang-Su Kim. Motion-Compensated Frame Interpolation Based on Multihypothesis Motion Estimation and Texture Optimization. *IEEE Transactions on Image Processing*. 2013. Vol. 22, no. 11. P. 4497–4509. URL: <https://doi.org/10.1109/tip.2013.2274731> (date of access: 25.04.2022).
16. An Overview of Core Coding Tools in the AV1 Video Codec / Y. Chen et al. *2018 Picture Coding Symposium (PCS)*, San Francisco, CA, 24–27 June 2018. 2018. URL: <https://doi.org/10.1109/pcs.2018.8456249> (date of access: 25.04.2022).
17. Overview of the High Efficiency Video Coding (HEVC) Standard / G. J. Sullivan et al. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*. 2012. Vol. 22, no. 12. P. 1649–1668. URL: <https://doi.org/10.1109/tcsvt.2012.2221191> (date of access: 25.04.2022).
18. Xu M., Nguyen Canh T., Jeon B. Simplified Level Estimation for Rate-Distortion Optimized Quantization of HEVC. *IEEE Transactions on Broadcasting*. 2020. Vol. 66, no. 1. P. 88–99. URL: <https://doi.org/10.1109/tbc.2019.2941063> (date of access: 25.04.2022).
19. HoangVana X., Ascensob J., Pereiraa F. Improving predictive video coding performance with decoder side information. *2012 19th IEEE International Conference on Image Processing (ICIP 2012)*, Orlando, FL, USA, 30 September – 3 October 2012. 2012. URL: <https://doi.org/10.1109/icip.2012.6467505> (date of access: 25.04.2022).
20. Pixel-Wise Unified Rate-Quantization Model for Multi-Level Rate Control / H. Choi et al. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*. 2013. Vol. 7, no. 6. P. 1112–1123. URL: <https://doi.org/10.1109/jstsp.2013.2272241> (date of access: 25.04.2022).
21. Parallelized Rate-Distortion Optimized Quantization Using Deep Learning / D. Kianfar et al. *2020 IEEE 22nd International Workshop on Multimedia Signal Processing (MMSP)*, Tampere, 21–24 September 2020. 2020. URL: <https://doi.org/10.1109/mmmsp48831.2020.9287135> (date of access: 25.04.2022).
22. Zhang Y., Zhang C., Fan R. Fast Motion Estimation in HEVC Inter Coding: An Overview of Recent Advances. *2018 Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA ASC)*, Honolulu, HI, USA, 12–15 November 2018. 2018. URL: <https://doi.org/10.23919/apsipa.2018.8659650> (date of access: 25.04.2022).

Arpentii S.P. TECHNOLOGY OF OPTIMAL DISTRIBUTION OF SPEED AND VIRTUAL SUPPORT FRAMES FOR HIGHLY EFFICIENT VIDEO CODING

The High Performance Video Encoding (HEVC) standard has now become the most popular video encoding solution for video conferencing, broadcast and streaming. However, its compression performance is still a critical issue for the adoption of a large number of new video programs with higher spatial and temporal resolution. To increase the current performance of HEVC, the article proposes an effective distribution solution. The aim of this work is to develop a simple, non-standard MPEG video encoding tool by integrating a virtual reality solution in HEVC and refining the existing bitrate distribution scheme. The paper avoids the well-known approach of preliminary analysis, which requires the provision of several frames or group groups, which subsequently creates significant complexity and is not suitable for a number of applications. To achieve this goal, a heuristic quantization approach is proposed. In general, this approach usually faces the problem of the enormous computational complexity of video encoding, different data sets, and the nonlinearity of the encoding process. The proposed method adaptively distributes the compression rate for each encoded image in the image group using a dynamic lattice-based programming approach. To achieve this goal, the paper investigates lattice-based quantization parameters for each frame in a group of images, taking into account

the position of the time layer. Dynamic lattice-based programming is used to recursively search for the best offset of each time index (Tid). To study the creation of virtual reference frames (VRF) in the proposed HEVC, the image quality and computational complexity of virtual reference frames were evaluated. Creating a VRF, adopted in the article, includes three main steps: hierarchical motion estimation (HME) to initialize the motion vector field; motion vector refinement (MVR) to reduce quantization errors that often occur in decoded links; motion compensation for VRF interpolation. The results obtained for a wide range of tests showed that the proposed HEVC solutions based on TRA and VRF significantly exceed the corresponding standard methods of improving HEVC.

Key words: *video encoding, virtual reality, heuristic quantization, dynamic programming, virtual reference frames, time index.*

УДК 004.4

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.3/05>

Вакалюк Т.А.

Державний університет «Житомирська політехніка»

Янчук В.М.

Державний університет «Житомирська політехніка»

Чижмотря О.В.

Державний університет «Житомирська політехніка»

Чижмотря О.Г.

Державний університет «Житомирська політехніка»

Гришкун Є.О.

Державний університет «Житомирська політехніка»

Лаговський О. М.

Державний університет «Житомирська політехніка»

ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ РОЗРОБКИ МОДУЛЯ БАГАТОВАЛЮТНОСТІ ДЛЯ РУШІЯ OPENCART

У статті розглянуто теоретичні аспекти розробки модуля багатовалютності для рушія OpenCart. Технології електронної комерції спрямовані на відкриття нових ринкових можливостей та ніш, ефективні методи пошуку замовників, полегшення ведення справ із постійними клієнтами, зменшення обсягу паперової роботи з компаніями-партнерами, а також більший охоплення та задоволення потреб замовників та пропозиція клієнтам індивідуальних, персоналізованих рішень. Сервіси електронної комерції полегшують споживачам та компаніям вивчення товарів, полегшують процедури замовлення та оплати, а також надають цілий арсенал засобів пошуку, аналізу та вибору товарів – і все це в інтерактивному режимі.

Найбільш активно в системах Інтернет-бізнесу сьогодні розвиваються сервіси прийому та обробки замовлень, обміну електронними документами, комунікаційні послуги, платіжні сервіси та системи бізнес-інтелекту, супровід угод клієнтів на фондовому, грошовому та товарному ринках; оптимізація взаєморозрахунків між учасниками ринку та взагалі сприяння розвитку електронної комерції. Більшість сучасних веб-орієнтованих інформаційних систем для ведення електронної комерції онлайн реалізуються на CMS.

Оскільки існує досить велика кількість розроблених модулів багатовалютності для CMS-системи OpenCart, то наведено опис декількох з таких модулів і проведено порівняльну характеристику їх функціональних можливостей. У даній роботі було проведено огляд і порівняння аналогічних систем. Виявлено ряд інструментальних засобів та функціональних особливостей, які є спільними та найбільш доцільними для реалізації в даній системі.

Обґрунтовано вибір шаблону проектування, фреймворку та технологій розробки. Для реалізації модуля багатовалютності для системи OpenCart запропоновано використати інструмент OSMod для дотримання вимог щодо розробки модифікацій. На етапі проектування розроблено діаграми варіантів використання, діяльності, послідовностей, класів. Представлено опис структури таблиць БД, які безпосередньо пов'язані з даним модулем.

Наведено етапи циклів програмної реалізації модуля багатовалютності для CMS OpenCart.

Ключові слова: модуль, CMS, рушій, багатовалютність, розробка.

Постановка проблеми. Використання послуг електронних інформаційних систем, що базуються на Інтернеті та забезпечують підтримку підприємницької та економічної діяльності, стає

все більш актуальним у зв'язку зі стрімкою глобалізацією економічного простору та масовим поширенням та доступністю мережі Інтернет. На основі забезпечення електронних

бізнес-транзакцій, що здійснюються через мережу Інтернет, виникає можливість створення технологічної платформи для розгортання інформаційно, комунікаційно та операційно пов'язаної економіки, що відкриває нові виміри для забезпечення сталого соціально-економічного розвитку.

Технології електронної комерції спрямовані на відкриття нових ринкових можливостей та ніш, ефективні методи пошуку замовників, полегшення ведення справ із постійними клієнтами, зменшення обсягу паперової роботи з компаніями-партнерами, а також більший охоплення та задоволення потреб замовників та пропозиція клієнтам індивідуальних, персоналізованих рішень. Сервіси електронної комерції полегшують споживачам та компаніям вивчення товарів, полегшують процедури замовлення та оплати, а також надають цілий арсенал засобів пошуку, аналізу та вибору товарів – і все це в інтерактивному режимі.

Найбільш активно в системах Інтернет-бізнесу сьогодні розвиваються сервіси прийому та обробки замовлень, обміну електронними документами, комунікаційні послуги, платіжні сервіси та системи бізнес-інтелекту, супровід угод клієнтів на фондовому, грошовому та товарному ринках; оптимізація взаєморозрахунків між учасниками ринку та взагалі сприяння розвитку електронної комерції. Більшість сучасних веб-орієнтованих інформаційних систем для ведення електронної комерції онлайн реалізуються на CMS.

Існує досить велика кількість розроблених модулів багатовалютності для CMS-системи OpenCart. Наведемо описи декількох з таких модулів і порівняємо їх функціональні можливості.

OpenCart Multi Currency Extension. Дане розширення дозволяє адміністратору вмикати відображення декількох валют для ціни товару на веб-сайті. За допомогою цього розширення клієнти можуть переглядати ціну кожного товару в декількох валютах на сторінці категорій і на сторінці товару. Це допоможе зменшити паніку глобальних клієнтів щодо обчислення ціни у своїй місцевій валюті, оскільки тепер вони можуть переглядати ціни в кількох валютах.

Основні функції OpenCart Multi Currency Extension:

- Кілька варіантів валют. Адміністратор магазину має доступ до вмикання/вимикання та редагування багатовалютних налаштувань.
- Відображення багатьох валют на сторінці категорії
- Відображення багатьох валют на сторінці товару

- Відображення для користувачів-гостей. Клієнти, які не ввійшли в систему, можуть переглядати ціни в кількох валютах.

Multi-currency | Automatic and fixed rate | Different currencies. Даний модуль передбачає можливість задання ціни товарів в різних валютах в адміністративній частині. В клієнтській частині ціна товарів відображається в єдиній валюті, встановленій як поточна.

Можливості модуля:

- Поточні курси обміну від Yahoo
- Різні валюти за ціною, акції, знижки та опції
- Пакетне редагування валюти товарів за категоріями та/або брендами
- Можливість вказувати різні валюти для товарів;
- Можливість використовувати валюти з фіксованим курсом;
- Клієнти бачать суми у валюті за замовчуванням (розраховані за поточним курсом);
- Автоматичне оновлення курсу валют.

Етапи та особливості використання даного модуля:

Додавання валюти (Система – Локалізація – Валюти), в разі необхідності. Необхідно вказати правильний код валюти – великими літерами, наприклад USD, EUR, UAH.

Вибір для кожного товару, валюта якого відрізняється від основної, потрібної валюти (селектор знаходиться праворуч від поля ціни);

В разі якщо потрібна фіксована валюта, то потрібно створити нову валюту, написати фіктивний код валюти, наприклад FIX, FIC, FIE, щоб система оновлення не змінювала курс автоматично, в поле значення курсу написати значення курсу в відношенні до валюти, що відображається в клієнтській частині. Далі вибрати дану валюту для потрібних товарів.

Адміністративна панель:

- Ціни на товари можна встановлювати в різних валютах;
- Валюти встановлюються індивідуально для кожного товару, а також працює пакетне призначення, наприклад в BatchEditor;
- У замовленнях сума фіксується в дефолтній валюті, за курсом, що відповідає моменту оформлення замовлення (тобто ціна товару в замовленні буде фіксованою).
- Оновлення курсу валют відбувається при відкритті головної сторінки панелі адміністрування. Джерело обмінного курсу – Yahoo

Клієнтська частина:

- Усі ціни автоматично відображаються в основній валюті сайту;

- Роботи по перерахунку ціни опціонів, знижки на кількість;
- Працює перетворення в міні-кошик, кошик і замовлення;

- Також коректно працює перемикання між валютами в інтернет-магазині з перерахуванням на поточні курси.

Multi Currency PRO. Розширення для OpenCart, яке робить магазин сумісним із різними валютами та розширяє функції OpenCart за замовчуванням, такі як товари на основі валют, вибір валюти виробника та різні курси валют для них, автоматичне оновлення курсів валют, поля, накладні витрати тощо.

Серед основних функцій даного модуля можна виділити наступні:

- Базова валюта для продуктів
- Надбавки за продукти (у відсотках, у фіксованій сумі)
- Базова валюта за замовчуванням для виробників
- Кастомні курси валют виробників
- Додаткові збори для виробників
- Автоматичне оновлення валюти з кількох джерел
- Конвертер валют масового товару
- Різний вибір валюти для різних секцій інтернет-магазину
- Різні валюти для способів оплати
- Різна базова валюта для способів доставки

Огляд модулів для розширення функціональності OpenCart для роботи з багатьма валютами дає можливість зробити висновки про спільні характерні функції даних модулів:

- В адміністративній частині ціни на товари можна встановлювати в різних валютах;
- В клієнтській частині ціна для товару може відображатись або в одній валюті (основна), або в різних в залежності від рівня глобальності інтернет-магазину
- Конвертація валют здійснюється автоматично, використовуючи зовнішній API-конвертор, або через курс, що задається адміністратором для кожної валюти.

Формулювання цілей статті. Метою роботи є опис теоретичних аспектів для створення модуля багатовалютності для рушія OpenCart.

Виклад основного матеріалу. Суть задачі полягає в розробці модуля багатовалютності для CMS OpenCart. Даний модуль повинен надавати можливість вказувати ціни товарів у різних валютах. Вибрана валюта конвертується автоматично за курсом, вказаним у налаштуваннях магазину.

Даний модуль повинен враховувати можливість додавання цін у різних валютах, масове оновлення ціни при зміні курсу, проста установка як розширення в OpenCart, підтримка багатомовності (англійська та українська мови).

Перед початком розробки слід враховувати, що при створенні модулів:

- Не дозволяється змінювати основні таблиці БД. Якщо потрібно зберегти будь-які дані для розширення (модуля), необхідно створити нову таблицю та використовувати зв'язки. Проте якщо додається налаштування конфігурації, то його можна вставити в існуючу таблицю налаштувань

- Заборонено перезаписувати будь-які файли.
- Усі файли можна записувати лише в папки з розширеннями, за винятком шаблонів, які, звичайно, знаходяться в папці шаблонів.

- Усі розширення повинні мати відповідну сторінку адміністратора, яка дозволяє активувати, деактивувати або конфігурувати їх.

- OpenCart автоматично ідентифікує існуючі модулі, читаючи папку admin/controller/extension/module. Будь-які модулі, які існують у цій папці, автоматично відобразатимуться на сторінці списку модулів та на сторінці дозволів користувача.

Написання модуля для OpenCart вимагає знань основ структури самої системи OpenCart, яка реалізовує схему MVCL:

- Користувач надсилає запит на сервер через URL. Даний запит надходить до контролера.

- Контролер завантажує мову та встановлює змінну data для будь-якого тексту.

- Якщо потрібні дані з бази даних, контролер завантажує модель, здійснює запити і отримує результати з БД, надіслані моделлю. Далі контролер записує ці результати в дані.

- Всі дані сформовані контролером надсилаються до компоненту View, який відтворює та показує результат.

У директоріях catalog та admin можна спостерігати деревовидну структуру MVCL, тому щоразу, при створенні модулів або сторінок, потрібно дотримуватись такої структури каталогів:

Controller – контролер завантажує мову та встановлює змінну для будь-якого тексту, що використовується в даних. Якщо потрібні дані з бази даних, контролер завантажує модель, здійснює запит і модель надсилає результати, які контролер записує в дані.

Модель – Шар для роботи з БД, що відповідає за обробку запитів до бази даних. Завдання моделі – структуризація запитів до БД так, щоб інші файли мали доступ до тих самих запитів БД.

Вигляд – шар вигляду/шаблону/відображення – tpl-файли шаблонів – містять HTML-розмітку для реалізації макетів сторінок або компонентів сторінок.

Мова – Локалізація/Мова – даний шар призначений для полегшення перекладу. В ньому зіставляються змінні перекладу та текст на відповідній мові. Дані файли папок перекладаються відповідною мовою з однаковою назвою змінних.

OpenCart обробляє кожен вхідний запит із маршрутизацією з параметром *route*.

Система маршрутизації визначає, який метод класу контролера буде виконуватися на основі інформації із запиту та URL-адреси маршрутизації. Кожен запит виконується файлом FrontController. Контролер є єдиним файлом у фреймворку MVC-L, до якого можна отримати доступ за URL-адресою в OpenCart. Логіка аналізу URL та створення відповіді відбувається в контролері.

Для установки OpenCart та розробки модуля багатовалютності для даної системи використано наступну інфраструктуру та стек: Веб-сервер Apache, сервер баз даних MySQL, мова розробки PHP, MVC(L) фреймворк системи OpenCart, модуль OSMOD для розробки модифікаторів, середовище розробки PHPStorm.

Модуль багатовалютності для CMS OpenCart має наступні функціональні вимоги користувачької частини та адміністративної частини:

Клієнти (автентифіковані користувачі або гості):

1. Перегляд товару та його ціни у базовій валюті інтернет-магазину

2. Перегляд товару та його ціни у власній валюті

3. Здійснення оформлення замовлення у базовій валюті інтернет-магазину

Користувачі з роллю адміністратора:

1. Створення/редагування/видалення валюти з заданням її курсу

2. Створення та редагування товару з можливістю задання йому валюти

3. Задання або відключення автоматичної конвертації валюти для заданого товару

Отже, адміністратори мають можливість задавати ціни товарів у різних валютах. Це може стати в нагоді, якщо товар купується у різних поставальників у різній валюті. У формі редагування товару на OpenCart 3.0 біля поля «Ціна» додається вибір валюти. На сайті для користувачів ціна буде відображатися у валюті магазину, тобто вона автоматично перераховуватиметься за курсом.

Також адміністратори можуть перерахувати всі ціни, оновивши курс валют в адмінці у разі його стрибків. У списку товарів в адміністративній частині ціна відображатиметься із зазначеною адміністратором валютою для кожного товару індивідуально.

Побудуємо діаграму діяльності модуля багатовалютності для системи OpenCart (рис. 1). Дана діаграма ілюструє послідовність виконання діяльності на рівні клієнтів та адміністраторів. Клієнти можуть переглядати товари з цінами, конвертованими в основну валюту інтернет-магазину та здійснювати замовлення в основній валюті. Також їм доступна можливість переглядати ціни в власній валюті товару.

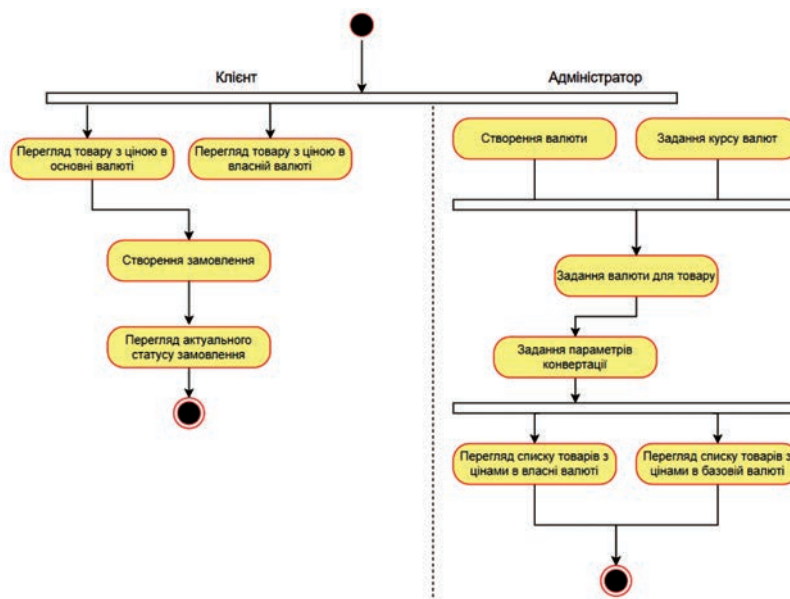


Рис. 1. Діаграма діяльності модуля багатовалютності для CMS OpenCart

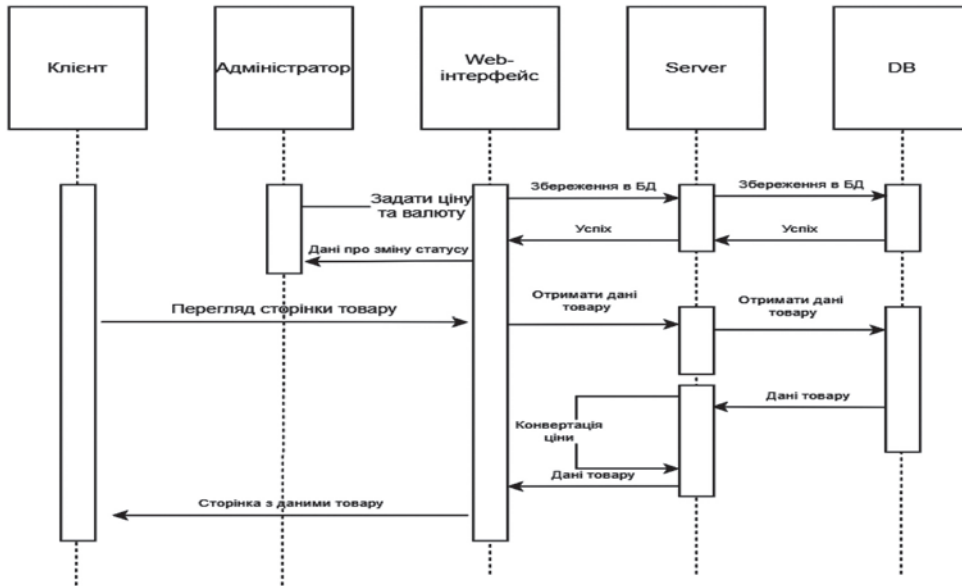


Рис. 2. Діаграма послідовності. Редагування товару з заданням йому ціни та валюти

Адміністратори магазину мають можливість створювати і задавати курс валюти по відношенню до базової валюти інтернет-магазину, а також задавати ціну та валюту для кожного товару окремо. Як додаткова функція, адміністратор задає параметри конвертації: або з зовнішнього АРІ або використовуючи курс валюти з БД.

Наведемо приклад діаграми послідовностей для редагування товару з заданням йому ціни та вибору валюти (див. рис. 2).

Для ілюстрації статичної структури даних та їх відношення побудуємо діаграму класів (рис. 3). Дана діаграма ілюструє відношення між класами, що безпосередньо є компонентами модуля багатовалютності.

User – це клас для компоненти користувача, який керує станом користувача, реалізує функціонал для реєстрації і автентифікації та зв’язаний з глобальним компонентом *user* додатку.

Product – клас, що реалізує операції для роботи з товарами. Currency – клас з набором методів для роботи з валютами.

ProductCurrency – клас, що працює відношеннями між товарами та валютами. Він асоціюється з класом Product зв’язком один до одного та з класом Currency зв’язком один до багатьох.

Таким чином, ми визначили структуру класів, які беруть участь у роботі модуля багатовалютності. Кожен клас при цьому є моделлю даних і відповідає таблиці в БД.

Розглянемо етапи розробки модуля багатовалютності для системи OpenCart.

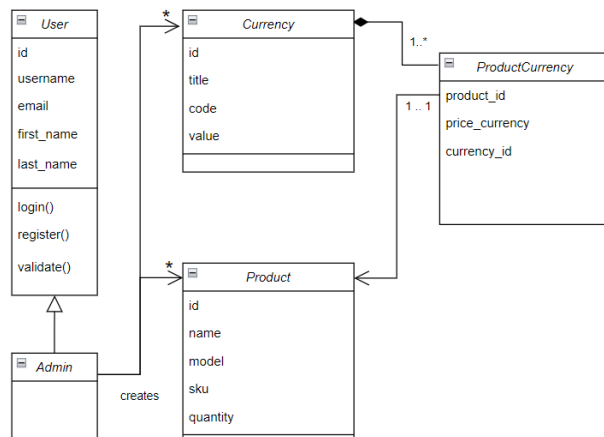


Рис. 3. Діаграма класів модуля багатовалютності

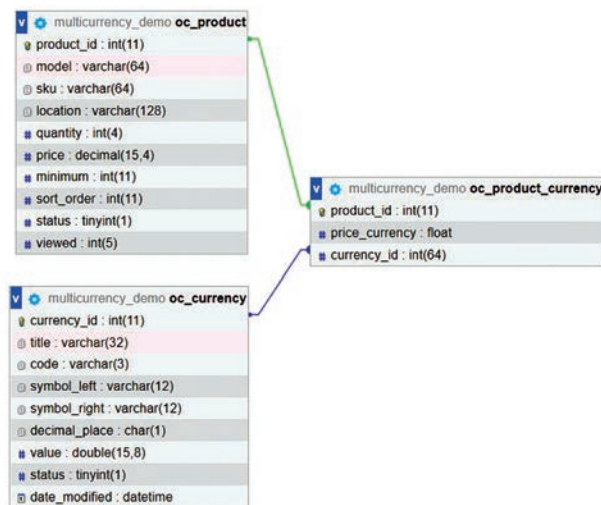


Рис. 4. Фрагмент структури бази даних

Етап 1. Файлова структура модуля. Основна файлова структура модуля повинна бути розділена на два розділи: папки `admin` та папки `catalog`. Вміст кожної папки відповідатиме структурі MVC-L відповідно, з тією різницею, що `admin` матиме справу лише з функціональними можливостями серверної частини, а `catalog` – із функціональними можливостями клієнтської частини. Користувачі модуля будуть взаємодіяти та налаштовувати його налаштування в адміністративній частині магазину. Таким чином, файли в папці адміністратора оброблятимуть будь-які зміни його налаштувань, способу відображення модуля в адмініструванні, встановлення/видалення модуля тощо. Аналогічно, спосіб відображення модуля та його роботи в клієнтській частині магазину оброблятимуться файлами в папці `catalog`.

Для початку розробки модуля в адміністративній частині потрібно врахувати:

- Для створення контролера, в ньому потрібно реалізувати щонайменше чотири методи: `index()`, `install()`, `validate()` та `uninstall()`
- Для створення мовного файлу, потрібно створити змінну та завантажити її в контролер, а також визначити як їй автоматично отримати доступ для компоненти `View`.

Цикл програмної реалізації запиту на додавання нової задачі

Етап 1. Розробка OSMOD XML файлу `install.xml`. Даний файл містить інструкції для модифікації вихідних файлів інтернет-магазину. До обов'язкових елементів структури OSMOD файлу відносяться:

- заголовок `<?xml version="1.0" encoding="utf-8"?>`
- `<modification></modification>` – без параметрів
- `<code></code>` – містить унікальний код (можна задати будь-який, що складається з цифр та латинських літер)
- `<name></name>` – містить ім'я модифікатора
- `<version></version>` – версія модифікатора
- `<author></author>` – автор модифікатора Далі йде код, який відповідає за модифікацію файлів:
- `<file path="admin/view/template/catalog/product_form.twig">`
`</file>` – вказує шлях до файлу, в якому необхідно зробити зміни
- `<operation></operation>` – так як в одному і тому ж файлі можуть примінятися різні операції, таких тегів може бути декілька в одному файлі.

Для додавання елементів форми редагування товару для вибору валюти і задання курсу валюти

потрібно здійснити пошук входження заданого рядка коду, після якого додаємо код з модифікатора. В нашому випадку це буде код `</div>` з 38-м входженням:

```
<file path="admin/view/template/catalog/product_form.twig">
  <operation>
    <search index="38">
      <![CDATA[ </div> ]]>
    </search>
    <add position="after">
  </operation>
</file>
```

Лістинг 1. Модифікація файлу з формою редагування товару `product_form.twig`

Після чого в тегах `<add></add>` вказуємо код, який буде додано в вихідний файл. При цьому в нього є важливий та обов'язковий атрибут `position`, який може приймати значення:

- *before* – код, що додається буде вставлений до коду, знайденого тегом `<search></search>`
- *after* – код, що додається буде вставлений після коду, знайденого тегом `<search></search>`
- *replace* – код, що додається, буде вставлений замість коду, знайденого тегом `<search></search>`

Після даної модифікації на формі створення/редагування товару повинні з'явитись відповідні елементи:

Рис. 5. Елементи для вибору валюти та задання курсу, що додаються до форми редагування товару

Наступний файл, що модифікується, – сторінка зі списком товарів, на яку потрібно додати кнопку для оновлення ціни всіх товарів (лістинг 2, рис. 6).

Метод, який обробляє запит на переобчислення цін для всіх товарів з врахуванням задання різних валют та різних курсів по відношенню до базової валюти магазину, додається як перша модифікація в контролер `product`.

```
<file path="admin/view/template/catalog/product_list.twig">
  <operation>
    <search>
      <![CDATA[ <a href="{{ add }}" data-toggle="tooltip" title="{{ button_add }}" class="btn btn-primary"><i cl
    </search>
    <add position="after">
      <![CDATA[ <button type="button" data-toggle="tooltip" title="{{ button_upload }}" class="btn btn-default"
        onclick="$('#form-product').attr('action', '{{ upload_currency }}').submit()>
        <i class="fa">{{ button_upload }}</i>
      </button> ]]>
    </add>
  </operation>
</file>
```

Лістинг 2. Елементи для вибору валюти та задання курсу, що додаються до форми редагування товару



Рис. 6. Результат модифікації – кнопка для оновлення ціни для всіх товарів

Наступний файл, необхідний для модифікації – модель Product. Модифікації доповнюють логіку роботи з даними для обчислення, задавання, зміни, отримання ціни товару в власній валюті та в базовій валюті інтернет-магазину.

Перша операція полягає в необхідності отримання ціни товару у основній валюті інтернет-магазину при додаванні товару, враховуючи відправлену ціну товару в власній валюті, а також курс власної валюти по відношенню до основної. Друга операція здійснює додавання нового запису в таблицю *product_currency*, який містить інформацію про ціну товару у власній валюті, код валюти та ідентифікатор відповідного товару. Третя операція здійснює обчислення ціни товару у основній валюті при внесенні змін в ціну товару у власній валюті. Також вносяться зміни в таблицю *product_currency*. Четверта операція здійснює видалення запису про ціну товару у власній валюті з таблиці *product_currency*. Остання операція в модифікації файлу моделі товару полягає в додаванні методів

для отримання валют для відображення у формі редагування товару, отримання запису зі значенням (ціни) валюти за її кодом, отримання записів всіх власних валют для даного товару, отримання запису даних про власну валюту для даного товару, отримання даних про товари з приєднанням інформації про власну валюту, оновлення/внесення даних про ціну товару. При встановленні та деінсталяції модуля необхідно в контролері модуля реалізувати методи `install()` та `uninstall()` відповідно.

Висновки. У даній роботі було проведено огляд і порівняння аналогічних систем. Виявлено ряд інструментальних засобів та функціональних особливостей, які є спільними та найбільш доцільними для реалізації в даній системі.

Обґрунтовано вибір шаблону проектування, фреймворку та технологій розробки. Для реалізації модуля багатовалютності для системи OpenCart запропоновано використати інструмент OSMOD для дотримання вимог щодо розробки модифікацій. На етапі проектування розроблено діаграми варіантів використання, діяльності, послідовностей, класів. Представлено опис структури таблиць БД, які безпосередньо пов'язані з даним модулем.

Наведено етапи циклів програмної реалізації модуля багатовалютності для CMS OpenCart.

Список літератури:

1. Керівництво розробника OpenCart. URL: <https://docs.ocstore.com/> (дата звернення: 20.03.2022).
2. Розробка модулів для OpenCart. URL: <http://docs.opencart.com/en-gb/developer/module/> (дата звернення: 20.03.2022).
3. Інструкції та керівництво адміністрування OpenCart 3. URL: <https://opencart-3x.ru/oc3-administration/doc-oc3/> (дата звернення: 20.03.2022).
4. Що таке OpenCart URL: <https://www.digitbox.net/company/docs/OpenCart-Debian> (дата звернення: 20.03.2022).
5. OSMOD: Інструкція розробника URL: <https://ocmod.net/ocmod-instruktsiya-dlya-razrabotchika> (дата звернення: 20.03.2022).
6. Документація PHP. URL: <https://www.php.net/docs.php> (дата звернення: 20.03.2022).
7. Bootstrap documentation URL: <https://getbootstrap.com/> (дата звернення: 20.03.2022).
8. MySQL: керівництво розробника. URL: <https://www.opennet.ru/docs/RUS/mysqldev/> (дата звернення: 20.03.2022).

Vakaliuk T.A., Yanchuk V.M., Chyzhmotria O.V., Chyzhmotria O.H., Gryshkun Ie.O., Lagovskii O.M. THEORETICAL ASPECTS OF THE DEVELOPMENT OF A MULTI-CURRENCY MODULE FOR THE OPENCART ENGINE

The article considers the theoretical aspects of the development of a multi-currency module for the OpenCart engine. E-commerce technologies are aimed at opening new market opportunities and niches, effective methods of finding customers, facilitating business with regular customers, reducing paperwork with partner companies, as well as greater coverage and customer satisfaction, and offering customers individual, personalized solutions. E-commerce services make it easier for consumers and companies to study products, facilitate ordering and payment procedures, and provide a whole arsenal of tools for finding, analyzing, and selecting products – all online.

Today, the most active Internet business systems are services for receiving and processing orders, electronic document exchange, communication services, payment services, and business intelligence systems, support

for customer transactions in the stock, money, and commodity markets; optimization of mutual settlements between market participants and in the general promotion of e-commerce development. Most modern web-based information systems for online e-commerce are implemented on CMS.

As there is a large number of developed multi-currency modules for the OpenCart CMS system, a description of several of these modules is given and a comparative description of their functionality. In this paper, a review and comparison of similar systems were performed. Some tools and functional features that are common and most appropriate for implementation in this system have been identified.

The choice of design template, framework, and development technologies is substantiated. To implement the multi-currency module for the OpenCart system, it is proposed to use the OCMOD tool to meet the requirements for the development of modifications. At the design stage, diagrams of usage options, activities, sequences, and classes have been developed. A description of the structure of database tables that are directly related to this module is presented.

The stages of cycles of software implementation of the multicurrency module for CMS OpenCart are given.

Key words: *module, CMS, engine, multicurrency, development.*

УДК 004

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.3/06>

Завгородній В.В.

Державний університет інфраструктури та технологій

Завгородня Г.А.

Державний університет інфраструктури та технологій

Валявська Н.О.

Державний університет інфраструктури та технологій

Герасименко О.О.

Державний університет інфраструктури та технологій

Калюжний О.В.

Державний університет інфраструктури та технологій

Степовий А.В.

Державний університет інфраструктури та технологій

ПОШУК АНОМАЛІЙ У ДАНИХ ЗА ДОПОМОГОЮ МАШИНОГО НАВЧАННЯ

Робота присвячена питанню пошуку аномалій у даних, зокрема практичному аспекту даного питання. Цей напрямок у машинному навчанні є досить новим, тому в ньому багато відкритих завдань та серйозних викликів.

В основі машинного навчання лежить припущення, що дані для навчання, тестування та застосування взяті з одного й того самого розподілу. На жаль, у процесі застосування моделі це припущення може порушуватися, що призводить до незрозумілих наслідків – зсуву розподілу. Особливо такі порушення небезпечні в галузях, що вимагають швидкого та точного прийняття рішень.

Невизначеність у даних виникає через складну структуру даних, шумів і неоднозначність, а невизначеність у знаннях виникає у зв'язку з обмеженою кількістю прикладів, використовуваних для навчання моделі, або з відсутністю доступу до певної області даних.

Для вирішення завдання пошуку аномалій пропонується побудувати модель, яка б за певним прецедентом видавала значення, що трактується як міра аномальності. Після чого обирається певний поріг: всі прецеденти зі значенням аномальності менше оголошуються звичайними прецедентами, а інші – аномаліями.

Для оцінки якості роботи запропонованого методу пошуку аномалій використано підхід, що полягає у змішуванні двох наборів даних. Для цього беруться тестові частини двох наборів: одного, на навчальній частині якого навчалася модель, та другого, який модель ніколи не бачила. Ці тестові частини змішуються, а потім метод пошуку аномалій тестується як бінарний класифікатор: він відокремлює набір даних, який бачила модель, від набору даних, який модель бачить вперше.

Напрямок градієнтних методів є перспективним і конкурентоспроможним у порівнянні з описаними в літературі алгоритмами. У цій галузі грамотна постановка задачі та методика тестування рішень важлива не менше, ніж винахід нових рішень.

Ключові слова: машинне навчання, аномалії даних, пошук аномалій, метод градієнта, класифікація зображень.

Постановка проблеми. В основі машинного навчання лежить припущення, що дані для навчання, тестування та застосування взяті з одного й того самого розподілу. На жаль, у процесі застосування моделі це припущення може порушуватися, що призводить до незрозумілих

наслідків – зсуву розподілу [1; 2]. Особливо такі порушення небезпечні в галузях, що вимагають швидкого та точного прийняття рішень: медицина, фінанси, безпілотні автомобілі.

Системи машинного навчання часто просто ігнорують зсуви розподілу та продовжують

працювати у штатному режимі, не припускаючи, що відповіді на запити можуть бути невалідними [3; 4]. Щоб зробити роботу системи точнішою та зрозуміти причину походження некоректних даних, можна відловлювати такі порушення – потрібно лише додати можливість пошуку аномалій.

Машинне навчання і, зокрема, нейронні мережі вже глибоко проникли у багато сфер життя суспільства: рекомендації у соціальних мережах, медична діагностика, пошук таксі, торгівля на біржі, безпilotні автомобілі тощо. У деяких із цих галузей ціна помилки не велика, а в деяких – може коштувати людського життя [2; 5]. Тому дуже важливо, щоб практичне застосування алгоритмів машинного навчання було максимально безпечним.

Пошук аномалій у даних – це окремий випадок ширшого завдання з оцінки невизначеності передбачення. Вона поділяється на оцінку невизначеності у даних (*aleatoric uncertainty*) та оцінку невизначеності у знаннях (*epistemic uncertainty*). Невизначеність у даних виникає через складну структуру даних, шумів і неоднозначність, а невизначеність у знаннях виникає у зв'язку з обмеженою кількістю прикладів, використовуваних для навчання моделі, або з відсутністю доступу до певної області даних. Дана стаття наголошує в першу чергу на практичному аспекті процесу пошуку аномалій у даних.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для того, щоб застосовувати пошук аномалій до довільних завдань машинного навчання, насамперед треба вирішити завдання класифікації. Розглянемо вирішення цього завдання на прикладі класифікації зображень, оскільки це досить широка, але водночас проста область моделювання.

Для завдання класифікації зсуви розподілу можуть бути, наприклад, такими:

- додавання шуму до зображень, що надходять;
- прецеденти, що належать класам, які були відсутні в навчальній вибірці;
- прецеденти, що належать класу, який був в навчальній вибірці, але представлені у новій тектурі або формі.

Завдання пошуку аномалій можна сформулювати так: потрібно побудувати якусь модель M , яка б за прецедентом x видавала значення $M(x)$, яке можна трактувати як міру аномальності. Після чого обирається певний поріг λ : всі прецеденти зі значенням аномальності менше λ оголошуються звичайними прецедентами, а інші – аномаліями. Тобто, щоб перевірити, чи є x аномалією, потрібно перевірити, чи правильна нерівність $M(x) \leq \lambda$.

Найпоширенішим способом оцінити якість роботи вищеописаного методу пошуку аномалій є змішування двох наборів даних. Для цього беруться тестові частини двох наборів: одного (інлаєра), на навчальній частині якого навчалася модель, та другого (аномалії), який модель ніколи не бачила. Ці тестові частини змішуються, а потім метод пошуку аномалій тестується як бінарний класифікатор: він повинен відокремити набір даних, який бачила модель, від набору даних, який модель бачить вперше. За метрику якості можна брати будь-які метрики для бінарної класифікації, наприклад класичні метрики *ROC-AUC* або *PR-AUC*.

Це стандартна процедура апробації методів пошуку аномалій [6–9]. Проте ця процедура має істотний недолік: вона перевіряє лише те, як добре метод знаходить аномалії, але ніяк не враховує якість вирішення вихідної задачі класифікації на прецедентах, оголошених інлаєрами. У даній статті пропонується новий спосіб оцінювання пошуку аномалій, який враховує цей недолік.

Для вирішення завдань пошуку аномалій у даних були розглянуті наступні існуючі рішення:

- *Maximum Softmax Probability (MSP)* – це найпростіший та інтуїтивно зрозумілий метод [6]. В якості $M(x)$ використовується негативна максимальна *softmax*-ймовірність. Таким чином, якщо нейронна мережа видає якийсь клас із досить високою ймовірністю, то прецедент x оголошується інлаєром.
- *ODIN* – це модифікований метод *MSP*, який використовує додатковий препроцесінг зображення [7]. Такий самий препроцесінг використовується у запропонованому в даній статті градієнтному методі.
- Ансамблеві методи – це методи, що використовують кілька навчених різними генераторами випадкових значень нейронних мереж однакової архітектури [8; 9]. Їх передбачення агрегуються певним чином, щоб отримати міру аномальності прецеденту. Ансамблеві методи математично обґрунтовані, але надто важкі для інтеграції у виробничі системи.

Постановка завдання. Машинне навчання припускає, що вхідні дані в процесі експлуатації моделі беруться з того самого розподілу, з якого були взяті дані на етапі навчання. Насправді, це припущення виконується вкрай рідко: у таких випадках спостерігається зсув розподілу, що може призвести до практично будь-яких наслідків. Метою даної статті є дослідження зсувів розподілу, які можуть спостерігатися, та способів їх моделювання.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Для пошуку аномалій у даних при рішенні завдань класифікації зображень необхідне застосування певних тестів продуктивності. Найпопулярнішим тестом для продуктивності класифікації зображень є набір даних *ImageNet-1k* [10]. На його основі було створено тести для пошуку аномалій у завданні класифікації зображень. Для проведення досліджень було використано наступні набори даних:

- *ImageNet-O* – це деяка підмножина набору даних *ImageNet-22k*, яка не перетинається з *ImageNet-1k* [11]. Цей набір є зсувом, в якому додаються нові класи, які модель раніше не бачила.
- *ImageNet-R* складається із зображень, що належать класам оригінального набору даних *ImageNet-1k*, але представлені в інших текстурах та формах [12].
- *ImageNet-A* – це природні приклади, тобто зображення, які дуже складно коректно класифікувати нейронними мережами, навіть за умови присутності даних класів зображень в оригінальному наборі даних *ImageNet-1k* [11].

• *ImageNet-C* – це зашумлена версія тестової частини *ImageNet-1k* [13]. Набір даних складається з кількох видів шумів та кількох рівнів сили шуму. У роботі використовується лише *Frosted Glass Blur* з рівнем 5. Вибір конкретного шуму зумовлений тим, що у ньому *ResNet-50* показує найгірший результат класифікації.

Використання аналізу градієнтів для вирішення поставленого завдання, пояснюється двома підходами:

- *Influence functions* пояснює зміну прогнозу нейронної мережі при видаленні певного прецеденту з набору даних [14]. Це реалізується формулюванням першої та другої похідної за вагою моделі.
- *Neural Tangent Kernel* аналізує поведінку нескінченно широких нейронних мереж з погляду простору похідних за вагою моделі [15].

Завдання класифікації об'єктів a між класами $K = (1, \dots, k)$ найчастіше вирішують за допомогою мінімізації крос-ентропії:

$$-\sum_{k=1}^K r_{a,k} \log p_{a,k}, \quad (1)$$

де r – розподіл істинних значень, а p – розподіл ймовірностей прогнозів моделі.

Евклідову норму градієнта крос-ентропії за вагою моделі можна використовувати як міру аномальності:

$$M(x) = \left\| \nabla_{\Theta} \left(-\sum_{k=1}^K r_{a,k} \log p_{a,k} \right) \right\|_2, \quad (2)$$

де Θ – оцінка наближення невідомого параметра на основі деяких даних.

Інтуїтивно це можна розуміти так: якщо прецедент є аномалією, модель не знає, що з ним робити. Тоді градієнт буде досить великим, оскільки прецедент несе у собі велику кількість інформації. Якщо ж прецедент є інлаером, він принесе у собі малу кількість нової інформації, що виявиться у невеликому значенні градієнта.

Припустимо, що нейронна мережа $f = (f_1, \dots, f_k)$ навчена класифікувати K класів. Для кожного входу x нейронна мережа призначає мітку, обчислюючи *softmax* вихід для кожного класу. Далі можна докладніше розписати градієнт крос-ентропії w , щоб декомпозувати його у добуток двох множників:

$$\nabla_{\Theta} w(x, \hat{\Theta}) = -\nabla_{\Theta} \log \frac{\max_k e^{f_k(x, \Theta)}}{\sum_{k=1}^N e^{f_k(x, \Theta)}} \Big|_{\hat{\Theta}} = V(x, \hat{\Theta}) \cdot D(x, \hat{\Theta}), \quad (3)$$

де $\hat{\Theta}$ – точкова оцінка наближення невідомого параметра.

V – частина – це максимум *softmax*-ймовірності, а D – частина – це множник, що відповідає за похідну за вагами моделі. Така декомпозиція дозволяє відокремити два джерела інформації одне від одного. У якості градієнтного методу можна використовувати добуток ($V(x, \Theta) \cdot D(x, \Theta)$) або ж просто $D(x, \Theta)$.

$$V(x, \Theta) = \frac{1}{1 + \sum_{k \neq \hat{k}} e^{(f_k(x, \hat{\Theta}) - f_{\hat{k}}(x, \hat{\Theta}))}} \quad (4)$$

$$D(x, \Theta) = -\sum_{k \neq \hat{k}} e^{(f_k(x, \hat{\Theta}) - f_{\hat{k}}(x, \hat{\Theta}))} \frac{\partial (f_k(x, \Theta) - f_{\hat{k}}(x, \Theta))}{\partial \Theta} \Big|_{\hat{\Theta}} \quad (5)$$

Для пошуку аномалій використаємо алгоритм *ODIN*, який реалізує спеціальний препроцесінг, що складається з двох частин: внесення шуму в *softmax* і вихідну картинку [7]. Замість звичайного *softmax* використаємо *softmax* із температурою T :

$$D(x, \Theta) = -\sum_{k \neq \hat{k}} e^{(f_k(x, \hat{\Theta}) - f_{\hat{k}}(x, \hat{\Theta}))} \frac{\partial (f_k(x, \hat{\Theta}) - f_{\hat{k}}(x, \Theta))}{\partial \Theta} \Big|_{\hat{\Theta}} \quad (6)$$

Замість прецеденту x візьмемо

$$x_p = x - \gamma \text{sign}(-\nabla_x \log V_{k'}(x, T)) \quad (7)$$

Потім до прецеденту x_p застосовується описане вище обчислення норми градієнта, щоб отримати функцію $M(x)$.

Оптимальні значення параметрів γ та T підбираються методом перебору по сітці на невеликій валідаційній вибірці.

Для експериментів було обрано дві архітектури нейронних мереж: *ResNet-18* та *ResNet-50*. Для експериментів з *ResNet-50* було навчено чотири

ImageNet-подібні набори даних. Значення *ROC-AUC*

| | <i>Dataset</i> | <i>MSP</i> | <i>ODIN</i> | <i>Ensemble</i> | <i>G-part</i> | <i>SG-part</i> |
|------------------|-------------------|---------------|---------------|-----------------|---------------|----------------|
| <i>ResNet-18</i> | <i>ImageNet-O</i> | 0,484 ± 0,006 | 0,628 ± 0,007 | — | 0,760 ± 0,006 | 0,804 ± 0,006 |
| | <i>ImageNet-R</i> | 0,776 ± 0,001 | 0,840 ± 0,001 | — | 0,852 ± 0,001 | 0,833 ± 0,002 |
| | <i>ImageNet-A</i> | 0,818 ± 0,003 | 0,848 ± 0,002 | — | 0,853 ± 0,002 | 0,837 ± 0,002 |
| | <i>ImageNet-O</i> | 0,943 ± 0,001 | 0,974 ± 0,001 | — | 0,985 ± 0,001 | 0,950 ± 0,001 |
| <i>ResNet-50</i> | <i>ImageNet-O</i> | 0,470 ± 0,006 | 0,599 ± 0,007 | 0,612 ± 0,006 | 0,735 ± 0,006 | 0,769 ± 0,006 |
| | <i>ImageNet-R</i> | 0,803 ± 0,002 | 0,863 ± 0,001 | 0,856 ± 0,001 | 0,877 ± 0,001 | 0,856 ± 0,001 |
| | <i>ImageNet-A</i> | 0,839 ± 0,002 | 0,872 ± 0,002 | 0,885 ± 0,002 | 0,877 ± 0,002 | 0,859 ± 0,002 |
| | <i>ImageNet-O</i> | 0,937 ± 0,001 | 0,969 ± 0,001 | 0,976 ± 0,001 | 0,982 ± 0,001 | 0,958 ± 0,001 |

моделі з різним генераторами випадкових значень для тестування ансамблевих методів (табл. 1).

З таблиці 1 видно, що запропоновані методи (*G-part* та *SG-part*) перевершують решту бейзлайнів у семи випадках з восьми. *G* показує себе краще практично за всі бейзлайни, у той час як *SG* обганяє *G* на *ImageNet-O*, але йому не вистачає якості на *ImageNet-A/R/C* щодо інших бейзлайнів. Це досить несподіваний ефект, якому поки що немає пояснень. Таким чином, *G-part* вже достатньо для переваги над іншими рішеннями, але його результат на якихось доменах можна покращити, додавши інформацію від останнього шару мережі, тобто *softmax*-прогнозування моделі.

Варто зазначити, що єдиний бейзлайн, котрому програли градієнтні методи, – це ансамблі. Порівняння з ними дещо некоректне, оскільки це набагато «важчі» методи ніж *MSP*, *ODIN* та запропоновані *G-part* та *SG-part*. Ансамблі практично неможливо застосовувати на практиці, на від-

міну від інших, «легших» методів, які можна без проблем вбудовувати в реальні завдання. Таким чином, у цьому програші немає нічого незвичайного, але немає й нічого страшного.

Важливо додати, що *ODIN* та градієнтні методи вимагають налаштування гіперпараметрів на валідаційній вибірці, що накладає деякі обмеження на використання методу. Проте існує низка ідей, які можуть дозволити позбутися настроювання параметрів.

Висновки. У даному дослідженні розглянуто питання пошуку аномалій у даних. Цей напрямок у машинному навчанні є досить новим, тому в ньому багато відкритих завдань та серйозних викликів. Напрямок градієнтних методів є перспективним і конкурентоспроможним у порівнянні з описаними в літературі алгоритмами. У цій галузі грамотна постановка задачі та методика тестування рішень важлива не менше, ніж винахід нових рішень.

Список літератури:

1. V. Mukhin, Y. Komaga, V. Zavgorodnii, A. Zavgorodnya, O. Herasymenko and O. Mukhin, "Social Risk Assessment Mechanism Based on the Neural Networks," 2019 IEEE International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT), 2019, pp. 179-182. DOI: <https://doi.org/10.1109/ATIT49449.2019.9030519>.
2. Valerii Zavgorodnii, Anna Zavgorodnya, Vladyslav Maiko, Valerii Malikov, & Dmytro Zhuk. (2018). METHODS AND MODELS FOR ASSESSMENT OF RELIABILITY OF STRUCTURAL-COMPLEX SYSTEMS. World Science, (11(39)), 5-14. DOI: https://doi.org/10.31435/rsglobal_ws/30112018/6227
3. V. Mukhin, Y. Kornaga, M. Bazaliy, V. Zavgorodnii, I. Krysak and O. Mukhin, "Obfuscation Code Technics Based on Neural Networks Mechanism," 2020 IEEE 2nd International Conference on System Analysis & Intelligent Computing (SAIC), 2020, pp. 1-6. DOI: <https://doi.org/10.1109/SAIC51296.2020.9239247>.
4. Valerii Zavgorodnii, Anna Zavgorodnya, Vladyslav Plisenko, Nikita Provatorov, & Pavlo Kudientsov. (2019). METHODS MODELING SYSTEMS FOR THE IMPROVEMENT OF THEIR RELIABILITY. International Academy Journal Web of Scholar, 1(9(39)), 3-11. DOI: https://doi.org/10.31435/rsglobal_wos/30092019/6683
5. Mukhin, V., Zavgorodnii, V., Barabash, O.V., Mykolaichuk, R.A., Kornaga, Y., Zavgorodnya, A., & Statkevych, V. (2020). Method of Restoring Parameters of Information Objects in a Unified Information Space Based on Computer Networks. International Journal of Computer Network and Information Security, vol.12, no.2, pp. 11–21. DOI: <https://doi.org/10.5815/ijcnis.2020.02.02>
6. Hendrycks, D., & Gimpel, K. (2016). A baseline for detecting misclassified and out-of-distribution examples in neural networks. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1610.02136>
7. Liang, S., Li, Y., & Srikant, R. (2017). Enhancing the reliability of out-of-distribution image detection in neural networks. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1706.02690>

8. Malinin, A., Mlodozienec, B., & Gales, M. (2019). Ensemble distribution distillation. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1905.00076>
9. Malinin, A., & Gales, M. (2018). Predictive uncertainty estimation via prior networks. *Advances in neural information processing systems*, 31. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1802.10501>
10. Russakovsky, O., Deng, J., Su, H. et al. ImageNet Large Scale Visual Recognition Challenge. *Int J Comput Vis* 115, 211–252 (2015). DOI: <https://doi.org/10.1007/s11263-015-0816-y>
11. Hendrycks, D., Zhao, K., Basart, S., Steinhardt, J., & Song, D. (2021). Natural adversarial examples. In *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (pp. 15262-15271). DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1907.07174>
12. Hendrycks, D., Basart, S., Mu, N., Kadavath, S., Wang, F., Dorundo, E., ... & Gilmer, J. (2021). The many faces of robustness: A critical analysis of out-of-distribution generalization. In *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision* (pp. 8340-8349). DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2006.16241>
13. Hendrycks, D., & Dietterich, T. (2019). Benchmarking neural network robustness to common corruptions and perturbations. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1903.12261>
14. Koh, P. W., & Liang, P. (2017, July). Understanding black-box predictions via influence functions. In *International conference on machine learning* (pp. 1885-1894). PMLR. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1703.04730>
15. Jacot, A., Gabriel, F., & Hongler, C. (2018). Neural tangent kernel: Convergence and generalization in neural networks. *Advances in neural information processing systems*, 31. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1806.07572>

Zavgorodnii V.V., Zavgorodnya A.A., Valyavska N.O., Gerasimenko O.O., Kalyuzhny O.V., Stepovy A.V. SEARCHING FOR ANOMALIES IN MACHINE LEARNING DATA

The work is devoted to the issue of finding anomalies in the data, in particular the practical aspect of this issue. This direction in machine learning is quite new, so it has many open tasks and serious challenges.

Machine learning is based on the assumption that data for training, testing and application are taken from the same distribution. Unfortunately, in the process of applying the model, this assumption can be violated, which leads to unclear consequences – a shift in the distribution. Such violations are especially dangerous in industries that require quick and accurate decision-making.

Uncertainty in data arises from complex data structures, noise, and ambiguity, and uncertainty in knowledge arises from the limited number of examples used to teach the model or the lack of access to a particular area of data.

To solve the problem of finding anomalies, it is proposed to build a model that would, according to a certain precedent, give a value that is interpreted as a measure of anomaly. Then a certain threshold is chosen: all precedents with the value of an anomaly are declared less than ordinary precedents, and others – anomalies.

To assess the quality of the proposed method of finding anomalies, an approach was used, which consists in mixing two sets of data. For this purpose, test parts of two sets are taken: one, on the training part of which the model studied, and the second, which the model has never seen. These test pieces are mixed, and then the anomaly search method is tested as a binary classifier: it separates the data set that the model saw from the data set that the model sees for the first time.

The direction of gradient methods is promising and competitive in comparison with the algorithms described in the literature. In this area, the competent formulation of the problem and the method of testing solutions is no less important than the invention of new solutions.

Key words: machine learning, data anomalies, anomaly search, gradient method, image classification.

Кандиба І.О.

Чорноморський національний університет імені Петра Могили

Горбань Г.В.

Чорноморський національний університет імені Петра Могили

Фісун М.Т.

Чорноморський національний університет імені Петра Могили

Ткаченко М.П.

Чорноморський національний університет імені Петра Могили

ДОСЛІДЖЕННЯ АПАРАТНО-ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ЛОКАЛЬНОЇ МЕРЕЖІ ЗАКЛАДУ ВИЩОЇ ОСВІТИ ЗАСОБАМИ МОВИ PYTHON

У статті представлено дослідження інструментарію аналізу апаратного забезпечення, що доступний для інтеграції з мовою загального призначення Python. Проведено аналіз сучасних досліджень в галузі моніторингу апаратно-технічного стану локальної мережі. Визначені бібліотеки, що розв'язують задачі моніторингу навантаження апаратних складових локальної мережі. Виявлено основні особливості роботи локальної мережі закладу вищої освіти. Наведено опис засобів Windows Management Instrumentation у якості інструменту визначення характеристик центрального процесора, оперативної пам'яті, накопичувачів даних тощо. Описано особливості впливу шкідливого програмного забезпечення на апаратне забезпечення. Представлено можливість поточного визначення поточного навантаження оперативної пам'яті psutil. Розглянуто інструменти моніторингу навантаження центрального процесора. Дослідженні засоби моніторингу роботи накопичувачів даних. Визначено доцільну модель для зберігання даних моніторингу. Розроблено структуру реляційної бази, що містить характеристики та дані навантаження апаратного забезпечення. Визначено найбільш доцільну СКБД, що зберігатиме зазначені дані. Наведено переваги застосування SQLite для реалізації програмного забезпечення моніторингу апаратного забезпечення. Представлено архітектуру розподіленого програмного забезпечення для моніторингу апаратного забезпечення. Запропоновано застосування засобів візуалізації застосованих даних шляхом підключення бібліотеки Matplotlib. Запропоновано застосування бібліотеки Statistics для використання методів визначення середнього показника навантаження. Реалізовано методи статистичної обробки даних споживання апаратних ресурсів. Описано можливість використання методу розрахунку середньоквадратичного відхилення для виявлення зміни навантаження та пошуку шкідливого програмного забезпечення. Визначено подальші шляхи розвитку запропонованої системи апаратно-технічного стану локальної мережі закладу вищої освіти.

Ключові слова: Python, WMI, psutil, СКБД, Matplotlib, моніторинг апаратного забезпечення.

Постановка задачі. Локальні мережі закладів вищої освіти (ЗВО) складаються з обладнання різного типу. До складу цих мереж входять комп'ютери з різними операційними системами та з різними апаратними архітекторами. Відмінності версій операційних систем (ОС) та архітектури комп'ютерів потребує тонкого налаштування мережевих серверів та служб [1, с. 117]: Active directory, DHCP, серверів оновлень тощо. Розв'язувати цю задачу не можливо за допомогою вбудованих засобів ОС.

Окрім того, моніторинг апаратно-технічного є необхідною складовою для забезпечення безпеки інформаційних ресурсів. Не зважаючи на

різноманітність шкідливого програмного забезпечення (ПЗ), всі представники цього класу ПЗ мають спільну рису – інтенсивне використання апаратних ресурсів [2, с. 5]. В залежності від класу шкідливого ПЗ відбувається використання різних апаратних ресурсів: жорсткого диска, центрального процесора (ЦП), оперативної пам'яті тощо.

Необхідним є створення засобів централізованого моніторингу апаратно-технічного стану локальної мережі в ЗВО, що дасть змогу системним адміністраторам виявлення шкідливого програмного забезпечення та дозволить спростити процес налаштування мережевих ресурсів та сервісів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Однією з головних цілей моніторингу апаратно-технічного стану локальної мережі є забезпечення інформаційних ресурсів від несанкціонованого доступу. У роботі [3, с. 14] досліджено особливості використання спеціалізованого апаратного забезпечення для перехоплення даних та порушення інформаційної безпеки локальної мережі. Автор описує можливість застосування пристроїв на основі мікроконтролерів для перехоплення натиснутих клавіш та пересилання перехоплених даних локальною мережею. В роботі недостатньо повне дослідження можливості перехоплення клавіш, а точніше використання програмних рішень для реалізації перехоплення.

Робота [4, с. 4] присвячена дослідженню ознак шкідливого програмного забезпечення. Висвітлено взаємозв'язок навантаження на апаратну складову комп'ютера та наявності шкідливого програмного забезпечення. Розглянуто ряд програмного забезпечення для моніторингу апаратних складових. Однак, у роботі не запропоновано централізованих методів моніторингу локальної мережі.

Визначення навантаження на апаратне забезпечення досліджено у [5, с. 66]. У цій роботі досліджено моніторинг апаратних ресурсів з метою поліпшення продуктивності комп'ютерів в локальній мережі. Запропоноване застосування мови програмування загального призначення Python для відстежування запущених процесів та спожитих ними ресурсів. Наведене дослідження містить аналіз реалізації моніторингу апаратних ресурсів, але недостатньо увагу приділено можливості визначення шкідливого програмного забезпечення.

Моніторинг мережевої активності досліджено у роботі [6, с. 105]. Це дослідження присвячено аналізу можливості використання об'єктних баз даних для зберігання даних мережевого трафіку. Запропоновано метод створення OLAP-куба мережевого трафіку на основі багатомірної моделі. В статті недостатньо увагу приділено можливості моніторингу та зберігання даних використання апаратних ресурсів комп'ютерної мережі.

Постановка завдання. Метою роботи є вдосконалення процесу дослідження апаратно-технічного стану локальної мережі закладу вищої освіти шляхом розробки спеціалізованого програмного забезпечення.

Для досягнення мети розв'язуються такі наукові завдання:

– дослідження засобів моніторингу апаратного забезпечення основі використання мови загального призначення Python;

– формування моделі даних для зберігання даних моніторингу апаратного забезпечення;

– реалізація засобів статистично обробки результатів зазначеного моніторингу;

– розробка засобів візуалізації отриманих даних моніторингу.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Локальна комп'ютерна мережа ЗВО має містити апаратне забезпечення різного типу для забезпечення навчально процесу різних спеціальностей інформаційних технологій. Налаштування цієї мережі можливе лише за наявності актуальних даних моніторингу комп'ютерів, що входять до її складу.

Мережеві сервіси для забезпечення коректної роботи студентів ЗВО, наприклад Active directory, вимагають створення окремих налаштувань для різних архітектур (AMD64, ARM тощо), версій операційних систем та ін. У ЗВО, як правило, наявна велика кількість персональних комп'ютерів (ПК), наприклад мережа ЧНУ імені Петра Могили містить більше ніж 500 робочих місць, що розміщені у різних наукових лабораторіях та відділах. Адміністратори відповідальні за апаратне та програмне забезпечення цих комп'ютерів, фізично не мають змоги аналізувати роботу цього обладнання та вести моніторинг його поточного стану.

Моніторинг апаратних ресурсів ПК є комплексною задачею, що потребує аналізу великої кількості складових. Розв'язати цю задачу можливо шляхом розробки програмного забезпечення мовою загального призначення.

Специфіка комп'ютерної мережі ЗВО вимагає створення універсального програмного забезпечення з високим ступенем модифікованості і переносності. Мова програмування загального призначення Python підтримує велику кількість модулів для наукових досліджень (Statistics, NumPy тощо) і підтримує можливість роботи з більшістю сучасних операційних систем [7, с. 3]. Наведений факт робить цю мову програмування доцільною для використання у якості засобу моніторингу апаратно-технічного стану локальної мережі ЗВО.

Моніторинг апаратного забезпечення реалізується кількома бібліотеками мови Python. За умови використання операційної системи сімейства Windows функціональною є бібліотека wmi, що є реалізацією Windows Management Instrumentation (WMI) [8, с. 2]. Цей інструмент є засобом керування ОС Windows та містить набір аналізу апаратного забезпечення.

WMI встановлюється за допомогою вбудованого менеджера керування пакунками python.

Моніторинг апаратного забезпечення відбувається в режимі реального часу, що дозволяє визначення характеристик та стану апаратних компонентів.

Оперативна пам'ять впливає на продуктивність комп'ютеру і є однією з головних апаратних складових. Визначити характеристики цього компоненту можливо за рахунок використання функції `Win32_PhysicalMemory()`. Цей метод повертає набір характеристик: модель, серійний номер, швидкість нити тощо. Використання цього методу дозволяє визначити поточну інформацію про фізичний оперативної пам'яті.

Виявлення шкідливого програмного забезпечення за рахунок моніторингу ресурсів потребує відстежування поточного навантаження на оперативну пам'ять. Реалізувати цей процес дозволяє бібліотека `psutil`, що також підключається до мови `Python`. Аналіз поточного навантаження оперативної пам'яті відбувається методом `virtual_memory()`, що відображає загальний об'єм, доступна та кількість оперативної пам'яті, яка використовується.

Характеристики ЦП можна визначити також за допомогою WMI, а саме методу `Win32_Processor`. Цей метод повертає назву моделі, тактову частоту, розмір кешу, набори команд ЦП та ін.. Наведена інформація є важливою для організації навчального ЦП, а саме для визначення можливостей проведення занять певних дисципліну у певних навчальних лабораторіях.

Значне навантаження на ЦП є одним з визначників показників наявності шкідливого програмного забезпечення. Моніторинг поточного застосування ЦП можливий також засобами `psutil`, що включає метод `cpu_percent()`. Цей метод повертає поточне навантаження кожного ядра ЦП.

Дізнатись характеристики накопичувачів даних, графічних процесорів, мережних адапторів та інших компонентів можливо іншими методами WMI, наприклад `Win32_DiskDrive()`, `Win32_VideoController()`, `Win32_NetworkAdapterConfiguration()`. Відстежити поточний стан навантаження на апаратні частини можливо отримати засобами `psutil`, наприклад `disk_partitions()`, `psutil.disk_usage()`.

Шкідливе програмне забезпечення завжди має бути представлено процесом. У більшості випадків процес маскується під інше програмне забезпечення, але його можна виявити за споживанням ресурсів. Аналіз запущених процесів можливо провести засобами `psutil` шляхом застосування методу `Win32_Process()`, що відображає запущені процеси. Окрім того, шкідливе програмне забезпечення може маскуватись серед запущених сервісів. Сервіси можливо моніторити також за допомогою `psutil` методом `Win32_Service()`.

Важливим фактором є розподіленість локальної мережі ЗВО, де кожна лабораторія може бути зоною відповідальності окремого адміністратора, викладача або кафедри. Наприклад в ЧНУ ім.

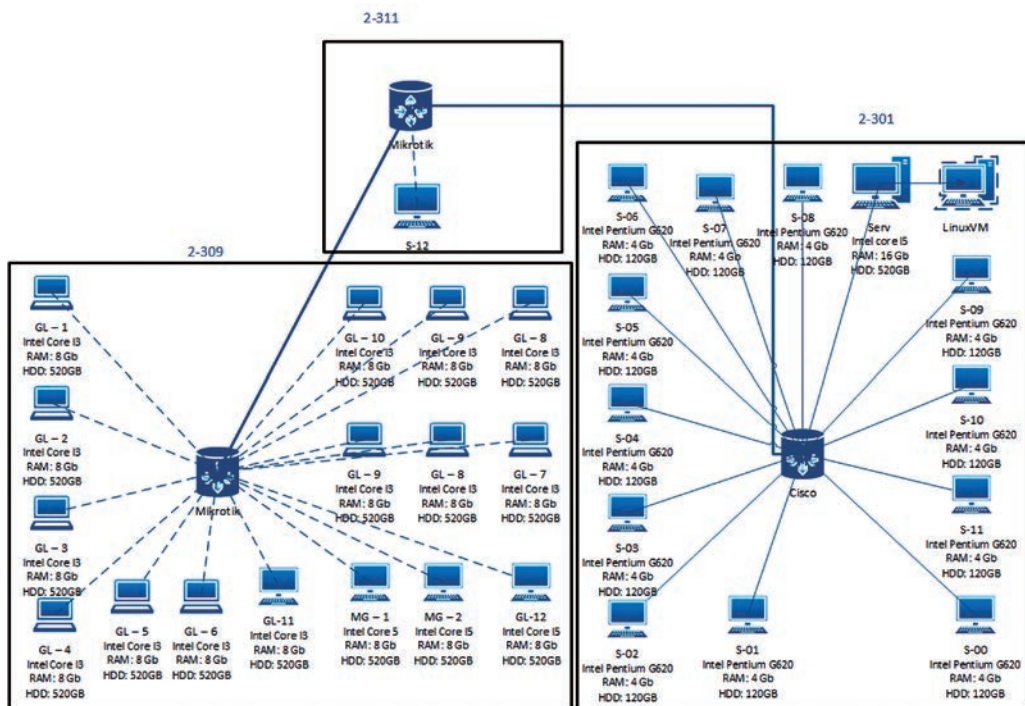


Рис. 1. Схематично відображення частини мережі ЗВО

Петра Могили на кафедрі інженерії програмного забезпечення наявні лабораторії системного програмного забезпечення та інженерії програмного забезпечення, що призначені для викладання абсолютно різних дисциплін і відповідно мають різне апаратне забезпечення (рис. 1). Централізована система апаратно-технічного стану дасть змогу визначати обчислювальні ресурси для можливості встановлення найновіших версій ПЗ.

Зібрані дані необхідно зберігати у спеціалізованому сховищі. Таким сховищем є база даних (БД), що базується на реляційній моделі даних. У БД цього типу окремими множинами можливо представити: процеси, характеристики апаратного забезпечення, зібрані дані навантаження тощо. Математично множини можливо представити у вигляді множини: $D_1 = \{d_{11}, d_{12}, d_{13}, \dots, d_{1n}\}$, $D_2 = \{d_{21}, d_{22}, d_{23}, \dots, d_{2m}\}$, $D_3 = \{d_{31}, d_{32}, d_{33}, \dots, d_{3p}\}, \dots, D_k = \{d_{k1}, d_{k2}, d_{k3}, \dots, d_{ks}\}$.

Кожен комп'ютер є підмножиною декартового добутку згаданих вище множин:

$$D_1 \times D_2 \times D_3 \times \dots \times D_k = \{(d_{11}, d_{21}, d_{31}, \dots, d_{k1}), \dots, (d_{1n}, d_{2m}, d_{3p}, \dots, d_{ks})\} \quad (1)$$

Зберігання зібраних даних у реляційній БД потребує використання спеціалізованого програмного забезпечення системи керування баз

даних (СКБД). Прикладом такого програмного забезпечення є SQLite. Це СКБД підтримується багатьма мовами програмування загального призначення, а також не вимагає наявності додаткового програмного забезпечення для обробки запитів [9, с. 241]. Ця СКБД представлена у вигляді окремих бібліотек та не має окремого серверу. Перевагою її використання є можливість перенесення створеної бази даних на локальний комп'ютер шляхом простого копіювання та значна швидкодія.

При створенні БД у СКБД SQLite для зберігання даних апаратно-технічного стану локальної мережі закладу вищої освіти необхідно врахувати характеристики апаратного забезпечення, статистичні дані навантаження, запущені процеси та сервіси (рис. 2).

Структура системи моніторингу даних апаратно-технічного стану локальної мережі бути побудована на основі архітектури клієнт-сервер. Де сервер представлений програмним забезпеченням для роботи з СКБД, а клієнт виконує збір даних поточних характеристик апаратного забезпечення та передачу зібраних даних до сервера.

Мова загального призначення Python підтримує можливість роботу з вебфреймворками, наприклад Django. Цей фреймворк дозволяє отримати

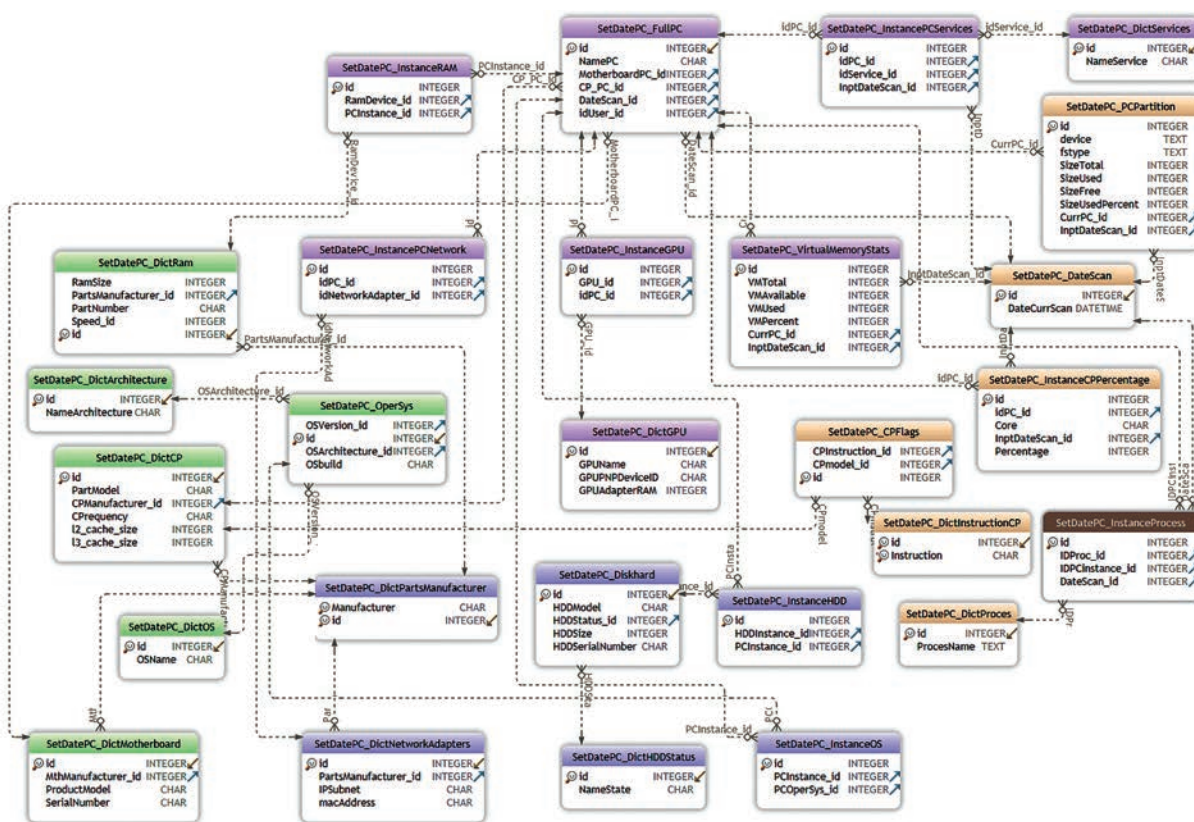


Рис. 2. Даталогічна модель БД для зберігання даних апаратно-технічного стану локальної мережі

дані від застосунку клієнту засобами вебзапиту і в майбутньому надати доступ для перегляду отриманих даних.

За замовчуванням Django підтримує можливість роботи з СКБД SQLite та реалізує об'єктно-реляційну модель (ОРМ) для спрощення роботи. Описані особливості дозволяють уникнути процесу написання модулю виконання запитів мовою SQL [10, с. 153].

Розподілена архітектура дозволяє використання одного серверу для підключення великої кількості клієнтів. Цей тип архітектури, за необхідності, дозволяє також використовувати окремий сервер з СКБД та знизити навантаження на сервер (рис. 3).

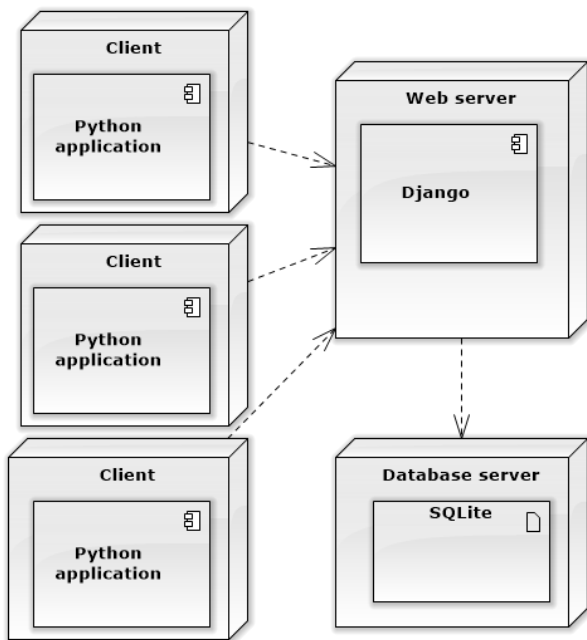


Рис. 3. Діаграма розгортання застосунку моніторингу даних апаратно-технічного стану локальної мережі ЗВО

Аналіз зібраних даних з метою виявлення аномальних показників навантаження на апаратне забезпечення потребує використання додаткових бібліотек, наприклад Matplotlib для графічного відображення отриманих даних.

Matplotlib є бібліотекою для роботи з двовимірною графікою на мові програмування Python [11, с. 3], за допомогою якої можна створювати високоякісні рисунки технічного характеру: двовірні, тривірні графіки тощо. При реалізації проекту моніторингу апаратно-технічного стану локальної мережі ЗВО Matplotlib може бути застосований для відображення навантаження задіяного об'єму оперативної пам'яті у різні дні (рис. 4).

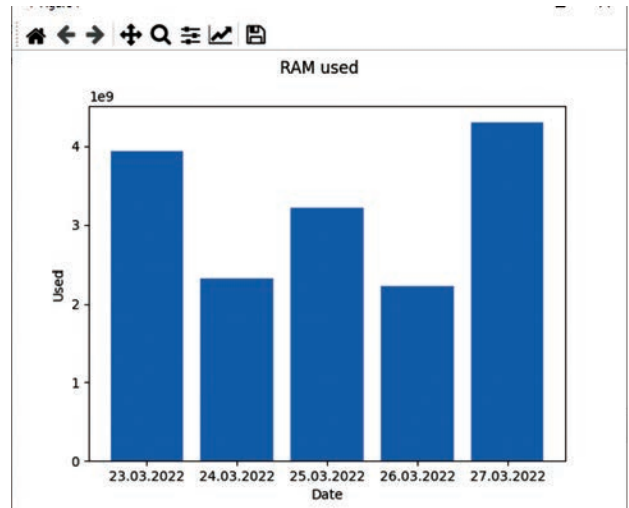


Рис. 4. Використання Matplotlib для візуалізації навантаження на апаратно складову

Візуалізація навантаження дає змогу визначити деякі значні відхилення, але більш дієвим є застосування засобів статистичної обробки, а саме бібліотеки Statistics [12, с. 43]. Ця бібліотека дозволяє визначити середній рівень навантаження апаратних складових різними методами:

- мода значення, що зустрічається найчастіше;
- медіана середній елемент сортованого ряду значень;

$$\tilde{X}_i = \frac{X_j + X_{j+1}}{2}, \quad (2)$$

де $j=1/2 N$, N кількість показників, X – ряду показників певної характеристики.

– **квартілі** – це певний показник, що ділить сукупність на чотири рівні частини. Найчастіше застосовують верхній (3) або нижній (4) квартіль:

$$Q_1 = (N + 1) * 1 / 4, \quad (3)$$

де N кількість значень характеристики.

Отже, значення показників за методом нижнього квартілю можна представити наступним чином:

$$\tilde{X} = X_{Q_1}$$

Верхній квартіль (Q_3) можна розрахувати за формулою

$$Q_3 = (N + 1) * 3 / 4 \quad (4)$$

На основі отриманих середніх значень можливо визначити середнє квадратичне (5), що може свідчити про появу шкідливого програмного забезпечення.

$$\text{stDev}(X) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}{N - 1}}, \quad (5)$$

де \bar{X} – середнє певної характеристики.

Висновки

В статті наведено дослідження засобів моніторингу апаратного забезпечення основі використання мови загального призначення Python. Розроблено БД для зберігання результатів моніторингу характеристик апаратної складової локальної мережі ЗВО. Запропоновано реалізацію візуального відображення зібраних даних для визначення

збільшення споживання апаратних ресурсів шкідливим програмним забезпеченням. Розроблено програмні засоби статистичної обробки навантаження на апаратного забезпечення.

В подальшому планується інтеграція методів штучного інтелекту для визначення взаємозв'язків апаратного забезпечення та активності шкідливого програмного забезпечення.

Список літератури:

1. Aleksieva V., Slavov S. Managed Active directory in directory-as-a-service. Fundamental sciences and applications. Vol. 24, 2018. P. 117–122.
2. Войтович О. П., Вітюк В. О., Каплун В. А. Особливості дослідження ознак шкідливого програмного забезпечення без наявності вихідних кодів. Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. Випуск 3. С. 4–9.
3. Гульчак Ю. П., Теренчук А. Т. Моніторинг використання пристроїв введення даних ПК локальних мереж. Склад організаційно-програмного комітету чотирнадцятої МНТК ВОТТП 14-15. 2015.С. 205.
4. Войтович О. П., Вітюк В. О., Каплун В. А. Особливості дослідження ознак шкідливого програмного забезпечення без наявності вихідних кодів. Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. Випуск 3. С. 2013. 4–9.
5. Velasco-Montero D., Fernández-Berni J., Rodr'iguez-Vázquez A. Relevant Hardware Metrics for Performance Evaluation. Visual Inference for IoT Systems: A Practical Approach. Springer, 2022. P. 61–88.
6. Фісун М. Т., Журавська І. М., Горбань Г. В. Інтеграція даних мережевого трафіку мультисервісної корпоративної мережі з класами постріляційної СКБД Caché. Наукові праці. Комп'ютерні технології. Том 161, 2011. С. 105–110.
7. Ziogas A. N., Schneider T., Ben-Nun T. Productivity, portability, performance: data-centric Python. Proceedings of the International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis(2021). P. 1–13.
8. Graeber M. Abusing Windows Management Instrumentation (WMI) to Build a Persistent, Asynchronous, and Fileless Backdoor. Black Hat. Las Vegas, NV, USA. 2015. URL: <https://app.oarklibrary.com/file/2/8101c69f-f4c0-4812-adca-1051f065b155/b36aa1b0-e925-4352-9cc4-48594c709efa.pdf>
9. Fisun M., Horban H., Kandyba I. Processing of Relational Algebra Expressions by the Shunting Yard Algorithm. 2019 IEEE 14th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)(2019). P. 240–243.
10. Mele A. Django 3 By Example: Build powerful and reliable Python web applications from scratch. Packt Publishing Ltd, 2020. 533 p.
11. Ari N., Ustazhanov M. Matplotlib in python. 2014 11th International Conference on Electronics, Computer and Computation (ICECCO)(2014). P. 1–6.
12. Kandyba I. O., Fisun M. T. Information technology for expert evaluation processing in scenario analysis of subject domain. SWorldJournal. Issue 9. P. 43–48.

Kandyba I.O., Horban H.V., Fisun M.T., Tkachenko M.P. INVESTIGATING THE HARDWARE STATUS OF THE UNIVERSITY'S LOCAL NETWORK USING PYTHON

This paper presents a study of the hardware analysis tools available for integration with the general-purpose Python language. An analysis of current research on monitoring the hardware and technical condition of the local network was carried out. The libraries that solve the task of monitoring the loading of the hardware components of the local network have been identified. The main features of the university's local network were revealed. The description of Windows Management Instrumentation as a tool for determining the characteristics of the central processor, RAM, data storages, etc. has been given. The peculiarities of malware's impact on hardware are described. The current RAM load detection capability of psutil is presented. Consideration is given to CPU load monitoring tools. The tools to monitor data storage performance are examined. Determined an appropriate model for storing monitoring data. Developed a relational database structure that contains hardware characteristics and load data. Determined the most appropriate DBMS to store the specified data. The advantages of using SQLite to implement hardware monitoring software are presented. The architecture of distributed software for hardware monitoring is presented. It is proposed to use tools for visualization of applied data by connecting Matplotlib library. The use of Statistics library to use methods for determining the average load indicator is proposed. Methods for statistical processing of hardware resource consumption data have been implemented. The possibility of using the method of calculating the standard deviation for detecting load changes and searching for malicious software is described. Further ways of development of the proposed system of hardware state of the local network of higher education are defined.

Key words: Python, WMI, psutil, DBMS, Matplotlib, Hardware monitoring.

Касіяненко Д.В.

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

АУТЕНТИФІКАЦІЯ КОРИСТУВАЧІВ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ КЛАВІАТУРНОГО ПОЧЕРКУ

Розглянуто сучасні методи розпізнавання користувачів мережевого сервісу на основі аналізу біометричних характеристик з метою аутентифікації. Зазначено, що проблема впровадження автоматизованих процедур аутентифікації у багатьох випадках показує низьку ефективність у зв'язку з недотриманням користувачами зазначеного регламенту стратегії захисту мережевих ресурсів. Вказано, що підходи, які базуються на аналізі біометричних характеристик користувачів, ефективно обмежують несанкціонований доступ до конфіденційних даних та послуг мережевого сервісу. Зазначено, що клавіатурний почерк є найбільш простим способом визначення біометричних характеристик, що не вимагає застосування додаткових апаратних засобів у рамках робочої платформи користувача. Представлена комплексна методика, що базується на основі аналізу таких параметрів як кількість помилок при наборі тексту, інтервали між натисканням окремих клавіш, час утримання окремих клавіш, наявність перекриття між клавішами, рівень аритмічності набору та швидкість набору тексту. Проведена формалізація надала можливість побудувати математичну модель, що базується на визначенні цільових показників точності аутентифікації користувачів мережевого сервісу та навантаження на обчислювальний ресурс апаратно-програмного комплексу мережевого сервісу. Показано, що зазначений підхід може бути використано з одного боку як основна система захисту, а з іншого – на рівні комплексного підходу, у рамках якого підсистема аналізу клавіатурного почерку ефективно доповнює систему аутентифікації на основі введення логіну та паролю. Представлено розширену методіку, що надає можливість проведення адаптації системи аутентифікації на основі біометричних параметрів, яка враховує поступову зміну клавіатурного почерку користувача та автоматично збільшує ефективність машинного аналізу на основі великих об'ємів статистичних даних.

Ключові слова: мережевий сервіс, аутентифікація користувачів, біометричні характеристики, клавіатурний почерк, ключ-шаблон, навчальна вибірка, екстремум цільової функції.

Вступ. Активний розвиток і поширення мережевих сервісів та, зокрема, впровадження хмарних центрів обробки даних (ЦОД), що спостерігається протягом останніх двох десятиріч призвели до необхідності розробки та оптимізації систем захисту мережевих ресурсів (Data Leakage Prevention Strategy, DLP-стратегія). Вирішення поставленої задачі включає у себе побудову високоефективних систем аутентифікації користувачів, що працюють у режимі реального часу з мінімальним навантаженням на обчислювальний ресурс апаратно-програмної платформи мережевого сервісу. У рамках сучасних підходів впровадження DLP-стратегії зумовлює повну автоматизацію процесу аутентифікації, що дозволяє зменшити об'єм роботи персоналу (особливо при масштабуванні інфраструктури мережевого сервісу) та уникнути помилок, пов'язаних з так званим «людським фактором». Водночас, має бути зазначено, що більшість користувачів мережевих сервісів досить безвідповідально відносяться до захисту персональних даних і у своїй більшості

не мають розуміння про ступінь небезпеки та базові процедури по аутентифікації, застосування яких дозволить знизити рівень кіберзагрози. Тому на сьогоднішній день перевага надається біометричним алгоритмам аутентифікації, що надають можливість виключити з процесу аутентифікації активні і усвідомлені дії користувачів та водночас ефективно здійснити процедуру машинного аналізу [1-5].

Аналіз сучасних досліджень і публікацій присвячених проблемам організації автоматизованих систем аутентифікації користувачів мережевого сервісу вказав, що сучасні методи базуються на виділенні таких біометричних характеристик як риси обличчя користувача, міміка, жести та голос [6-10]. Автори досліджень зазначають, що вказана задача є нетривіальною, і тому для її вирішення використовуються як складні програмні так і нейромережеві алгоритми, які дозволяють ефективно виділити типові аудіо- та відео-зразки, але при цьому призводять до значного навантаження на обчислювальний ресурс апаратно-

програмної платформи мережевого сервісу [6, 8-10]. Крім того, виділення відповідних біометричних характеристик зумовлює наявність та налаштування додаткового апаратного обладнання, як то камера і мікрофон достатньо високої якості, взаємне розташування користувача і камери, а також користувача і мікрофона, система освітлення, тощо. Слід зазначити, що передача аудіо- та відео-даних з метою аутентифікації користувача додатково призведе до навантаження на мережевий ресурс сервісу, що у окремих випадках може бути критичним за умов необхідності у режимі реального часу. Зазначені особливості побудови автоматичної системи аутентифікації на основі біометричних параметрів вказують на переваги застосування алгоритмів машинного аналізу клавіатурного почерку (Keystroke Dynamics, KsD) користувача мережевого сервісу [11-14]. Клавіатурний почерк користувача може бути повністю описано через мінімальний набір числових параметрів, що не потребує для автоматичної обробки складних алгоритмів. При цьому підсистема аналізу клавіатурного почерку може доповнювати базову систему аутентифікації, що базується на введенні логіну та паролю. Наведені дослідження включають визначення кількості помилок при наборі тексту, інтервалів між натисканням окремих клавіш, час утримання окремих клавіш, наявність перекриття між клавішами, рівень аритмічності набору та швидкість набору тексту [12-14]. Оцінка ефективності окремих підходів, тим не менш, не дає можливість визначити цілісну методологію побудови алгоритмів машинного аналізу клавіатурного почерку, що розглядається як *невиришена частина загального дослідження*.

Метою дослідження, таким чином, стала розробка комплексної методології побудови алгоритмів машинного аналізу клавіатурного почерку у рамках аутентифікації користувачів мережевого сервісу. Зазначений підхід включає у себе методику адаптації системи аутентифікації на основі біометричних параметрів, що враховує поступову зміну клавіатурного почерку користувача та автоматично збільшує ефективність машинного аналізу відповідно до статистичних даних, отриманих у процесі користування окремими послугами мережевого сервісу.

Виклад основного матеріалу дослідження. Формалізуємо процес машинного аналізу текстового набору системою аутентифікації мережевого сервісу. Нехай процес набору включає у себе $n \in [1; N]$ символів (з пропусками, включно). Позначимо час утримання окремої клавіші як t_n ,

а проміжок між натисканням клавіш n та $(n+1)$, як t_{n+1}^n , причому, якщо загальний час набору блоку N символів складає T , то зазначений показник може бути розраховано як $T = \sum_{n=1}^N t_n + \sum_{n=1}^{N-1} t_{n+1}^n$. Це дозволяє навести наступні біометричні характеристики, на основі яких може бути визначено клавіатурний почерк користувача (рис. 1):

- середній час утримання окремої клавіші $t_n = \frac{\sum_{n=1}^N t_n}{N}$;
- аритмія утримання клавіші, як максимальна різниця у часі утримання окремої клавіші $\Delta t_n = t_n - t_{n-1}$;
- середній проміжок між натисканням клавіш $t_{n+1}^n = \frac{\sum_{n=1}^{N-1} t_{n+1}^n}{(N-1)}$;
- аритмія набору символів, як максимальна різниця у проміжках між натисканням клавіш $\Delta t_{n+1}^n = t_{n+1}^n - t_{n+1}^{n-1}$;
- середня швидкість набору $V = \frac{N}{T}$;
- загальна кількість помилок у наборі N_E ;
- загальна кількість перекриттів між клавішами (Overlap Between Keys, OVK) як N_{OVK} .

Розширена модель у рамках аналізу відповідних параметрів набору $\{t_n, t_{n+1}^n\}$ може включати визначення залежностей для окремих клавіш або, радше, груп клавіш, що разом зі збільшенням точності процедури аутентифікації надає можливість зменшити навантаження на обчислювальний ресурс. У даному дослідженні пропонується виділити такі групи клавіш:

- група клавіш, що відповідають літерам, яка може бути розбита на дві рівні підгрупи: підгрупу клавіш у центрі клавіатури $\{S_i^0\}$ та підгрупу клавіш у периферійній області – $\{S_i^+\}$, де $i \in [1; I]$;
- група клавіш, що відповідають цифрам $\{S_j^N\}$, де $j \in [0; 9]$;
- група клавіш, що відповідають знакам пунктуації $\{S_m^p\}$, де $m \in [1; M]$;
- група клавіш $\{S_k^A\}$, де $k \in [1; K]$, що відповідають додатковим елементам, як то «Shift», «Ctrl», «Alt», для яких особливо важливо враховувати перекриття клавіш.

Нарешті, необхідно розглянути задачу адаптації розробленої моделі для вирішення задачі побудови комплексного алгоритму аутентифікації, що базується на введенні пари логін-пароль та доповнюється аналізом біометричних характеристик користувача мережевого сервісу. Застосування моделі аутентифікації користувача на основі клавіатурного почерку у рамках даної задачі має ряд переваг:

1. Дві послідовності логін і пароль є достатньо короткими і визначеними заздалегідь. Це надає можливість не поділяти символічний ряд на окремі групи

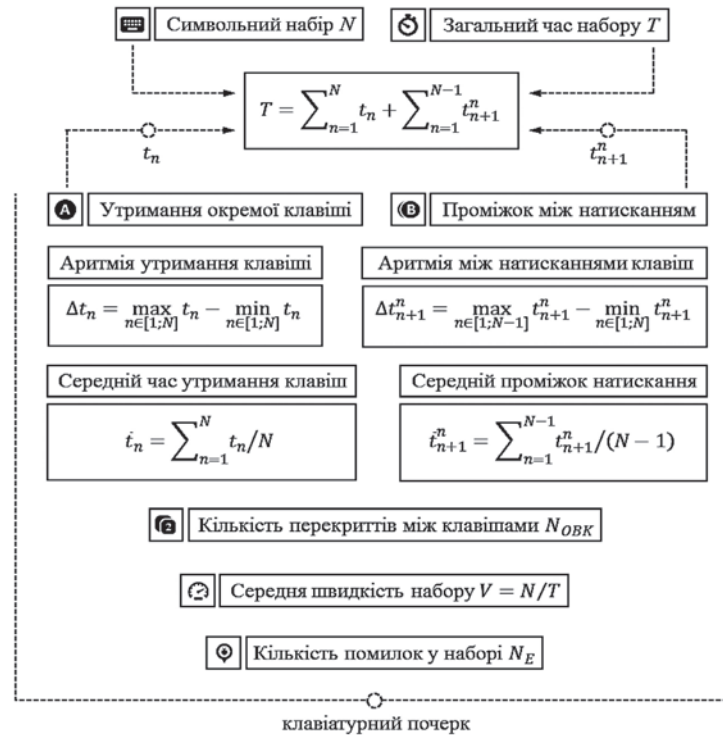


Рис. 1. Базова модель виділення набору біометричних параметрів, що відповідають клавіатурному почерку користувача мережевого сервісу

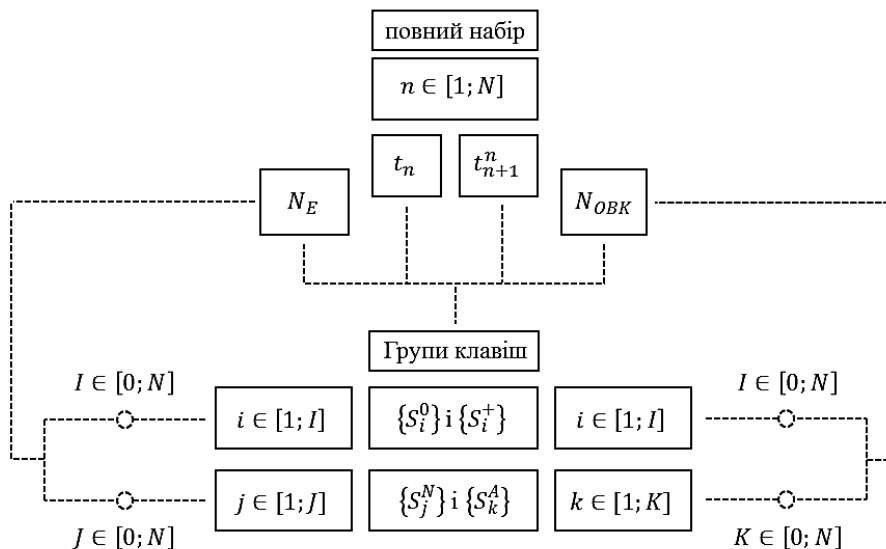


Рис. 2. Розширена модель машинного аналізу клавіатурного почерку користувача відповідно груп клавіш

відповідно їх розташування на клавіатурі, а аналізувати кожен символ окремо відповідно його положенню у текстових послідовностях пари логін-пароль.

2. Набір коротких послідовностей логін-пароль у рамках навчання користувача сервісу через повторення, а також у процесі безпосе-

реднього користування послугами сервісу відбувається несвідомо, що зумовлює стабільність відповідних біометричних параметрів, що відслідковуються системою аутентифікації.

3. Поєднання двох максимально простих систем аутентифікації надає можливість суттєво

збільшити рівень захисту без застосування додаткових апаратних засобів та при мінімальному навантаженні на обчислювальний ресурс апаратно-програмної платформи. Слід також зауважити, що з точки зору користувача процес навчання включає лише серію повторень при введенні логіна і пароля, що дозволить надійно запам'ятати дані аутентифікації облікового запису.

Формалізуємо на математичному рівні процес аутентифікації користувача мережевого сервісу на основі пари логін-пароль, введення якої підлягає машинному аналізу відповідно клавіатурному почерку. Нехай логін складається за $n \in [1; N_{LOG}]$ символів, а пароль – з $n \in [1; N_{PAS}]$, причому після створення зазначеної пари користувач мережевого сервісу має ввести його $r \in [1; R]$ разів. Повторення введення пари логін-пароль надає можливість отримати R груп значень, що відображають кількість помилок при наборі $\{N_{LOG}^E(r)\}$ і $\{N_{PAS}^E(r)\}$, відповідно, затримок при натисканні окремої клавіші $\{t_{LOG}^n(r)\}$ і $\{t_{PAS}^n(r)\}$, відповідно, а також проміжки часу між натисканням клавіш $\{t_{LOG}^{n|n+1}(r)\}$ і $\{t_{PAS}^{n|n+1}(r)\}$.

Статистичний аналіз для отримання на основі відповідного масиву зразку клавіатурного почерку включає у себе визначення наступних показників:

- середні значення відповідно рівня помилок при введенні логіну та паролю, що розраховуються як $N_{LOG}^E = \sum_{r=1}^R \left(\frac{N_{LOG}^E(r)}{R} \right)$ і $N_{PAS}^E = \sum_{r=1}^R \left(\frac{N_{PAS}^E(r)}{R} \right)$, відповідно;

- середні значення часу утримання окремої клавіші при введенні логіну та паролю як $N_{LOG}^E = \sum_{r=1}^R \left(\frac{N_{LOG}^E(r)}{R} \right)$ і $N_{PAS}^E = \sum_{r=1}^R \left(\frac{N_{PAS}^E(r)}{R} \right)$, відповідно;

- середні значення проміжку між натисканням клавіш символічних послідовностей логіну та паролю як $t_{LOG}^{n|n+1} = \sum_{r=1}^R \left(\frac{t_{LOG}^{n|n+1}(r)}{R} \right)$ і $t_{PAS}^{n|n+1} = \sum_{r=1}^R \left(\frac{t_{PAS}^{n|n+1}(r)}{R} \right)$, відповідно;

- дисперсія рівня помилок, квадрат якої розраховується як $(\sigma_{LOG}^E)^2 = \sum_{r=1}^R \left(\frac{N_{LOG}^E - N_{LOG}^E(r)}{R} \right)$ і $(\sigma_{PAS}^E)^2 = \sum_{r=1}^R \left(\frac{N_{PAS}^E - N_{PAS}^E(r)}{R} \right)$, для логіну та паролю, відповідно;

- дисперсія часу утримання окремої клавіші, квадрат яких розраховується як $(\sigma_{LOG}^T)^2 = \sum_{r=1}^R \left(\frac{t_{LOG}^n - t_{LOG}^n(r)}{R} \right)$ і $(\sigma_{PAS}^T)^2 = \sum_{r=1}^R \left(\frac{t_{PAS}^n - t_{PAS}^n(r)}{R} \right)$ для символічних послідовностей логіну та паролю, відповідно;

- дисперсія у значенні проміжку між натисканням клавіш символічних послідовностей, квадрат яких $(\sigma_{LOG}^{TT})^2 = \sum_{r=1}^R \left(\frac{t_{LOG}^{n|n+1} - t_{LOG}^{n|n+1}(r)}{R} \right)$ і $(\sigma_{PAS}^{TT})^2 = \sum_{r=1}^R \left(\frac{t_{PAS}^{n|n+1} - t_{PAS}^{n|n+1}(r)}{R} \right)$ для логіну та паролю, відповідно.

На основі наборів середніх значень та значень дисперсії через введення математичного очікування E , t -критерію Стьюдента, та значення вірогідності наявності помилок першого роду P_{EI} , а також визначення загальної кількості зразків

навчальної вибірки $l \in [1; L]$ у рамках розробленої математичної моделі процесу аутентифікації можуть бути розраховані інтервали допустимих значень цільових показників, що відповідають клавіатурному почерку, як це показано на рис. 3:

- інтервали для допустимої кількості помилок $N_{LOG}^E(r) \in [N_{LOG}^{E\downarrow}; N_{LOG}^{E\uparrow}]$ і $N_{PAS}^E(r) \in [N_{PAS}^{E\downarrow}; N_{PAS}^{E\uparrow}]$ для символічних послідовностей логіну та паролю, відповідно;

- інтервали для допустимого інтервалу часу утримання окремої клавіші $t_{LOG}^n(r) \in [t_{LOG}^{T\downarrow}; t_{LOG}^{T\uparrow}]$ і $t_{PAS}^n(r) \in [t_{PAS}^{T\downarrow}; t_{PAS}^{T\uparrow}]$ для символічних послідовностей логіну та паролю, відповідно;

- інтервали для допустимого проміжку між натисканням клавіш $t_{LOG}^{n|n+1}(r) \in [t_{LOG}^{TT\downarrow}; t_{LOG}^{TT\uparrow}]$ і $t_{PAS}^{n|n+1}(r) \in [t_{PAS}^{TT\downarrow}; t_{PAS}^{TT\uparrow}]$ для символічних послідовностей логіну та паролю, відповідно.

Зазначені інтервали дозволяють на кількісному рівні через статистичний аналіз однозначно визначити відповідність клавіатурного почерку окремому користувачу. Для підтвердження відповідності біометричних характеристик має бути виконано повний набір умов, вказаних вище.

Оптимізація алгоритму відбувається, з одного боку через варіювання показників E , t -критерію Стьюдента, L та P_{EI} , а з іншого шляхом розширення роботи з користувачем мережевого сервісу. У першому випадку оптимізація відбувається через пошук глобального екстремуму цільової функції точності машинного аналізу на основі методу градієнтного спуску або аналогічних методів. Другий підхід зумовлює необхідність повторення проходження користувачем процедури повторного введення пари логін-пароль M разів поспіль. Це допомагає як додатково уточнити допустимі інтервали, що визначають клавіатурний почерк, так і відслідкувати зміни у клавіатурному почерку, що може відбуватись протягом тривалого часу.

Висновки. В результаті проведеного дослідження було розглянуто методи аутентифікації користувачів мережевого сервісу на основі клавіатурного почерку. Була представлена методика, що базується на статистичному аналізі таких параметрів як кількість помилок при наборі тексту, інтервали між натисканням окремих клавіш, час утримання окремих клавіш, наявність перекриття між клавішами, рівень ритмічності набору та швидкість набору тексту.

Таким чином, було побудовано:

- базову модель виділення набору біометричних параметрів, що відповідають клавіатурному почерку користувача мережевого сервісу;

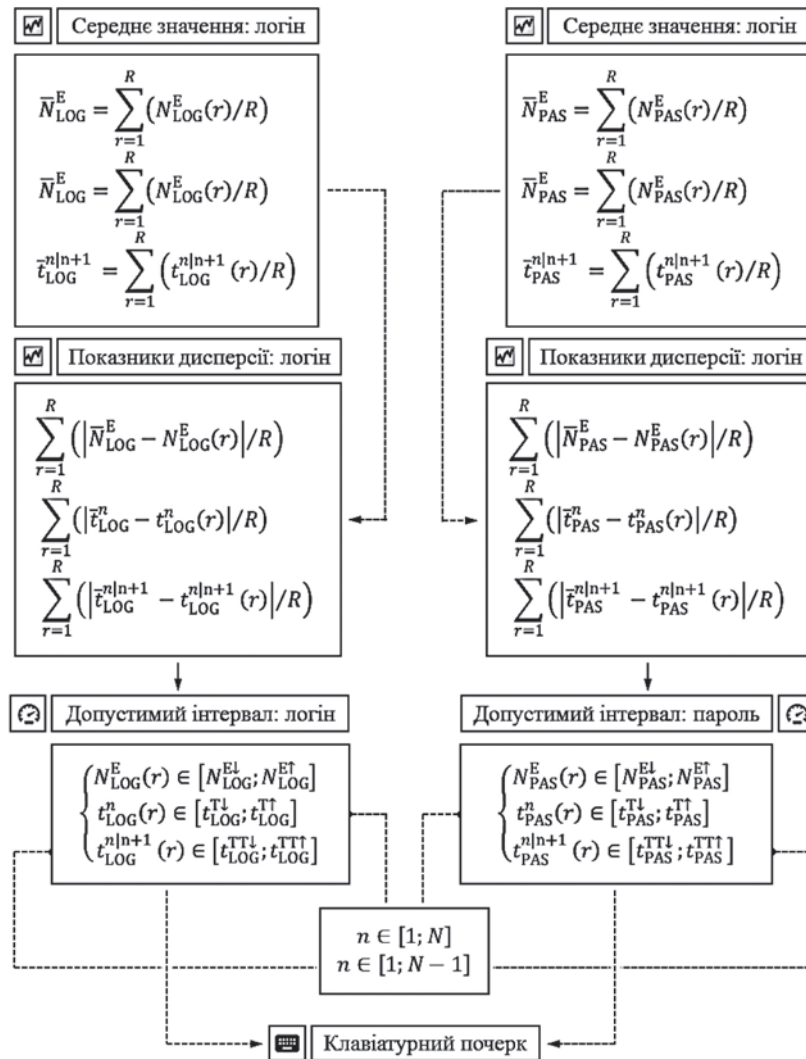


Рис. 3. Методика аутентифікації, що базується на введенні пари логін і пароль та машинному аналізі клавіатурного почерку користувача

- розширену модель машинного аналізу клавіатурного почерку користувача мережевого сервісу відповідно окремих груп клавіш;
- методику аутентифікації, що базується на введенні пари логін і пароль та додатковому машинному аналізі клавіатурного почерку користувача мережевого сервісу.

Представлена методика надає можливість суттєво підвищити рівень ефективності аутентифікації користувачів мережевого сервісу через аналіз зразків клавіатурного почерку. На основі побудованої моделі проводиться аналіз зміни клавіатурного почерку користувача та автоматично збільшується ефективність машинного аналізу завдяки роботі з великими об'ємами статистичних даних.

Список літератури:

1. Zhu, H.H. et al., Voiceprint-biometric template design and authentication based on Cloud Computing Security. *2011 International Conference on Cloud and Service Computing*. 2021. p. 34-49.
2. Gawade S. et al., Biometric authentication using software as a service in cloud computing. *International Journal Of Engineering And Computer Science*. 2017. p. 18-22.
3. Bharti A., Raj A. Sensory launches cloud-based voice and facial ID service. *Biometric Technology Today*. № 2022 (1) p. 2205-2211.
4. Lu Y., Zhao D. Providing impersonation resistance for biometric-based authentication scheme in Mobile Cloud Computing Service. *Computer Communications*. 2022. № 182, p. 22-30.

5. Hu H. et al., Toward a biometric-aware cloud service engine for multi-screen video applications. *Proceedings of the 2014 ACM Conference on SIGCOMM*. 2014. p. 11-17.
6. Zhang Z., Gong C., Liu R. Face Detection Based on Method Combined RVM and SVM. *Computer Science and Artificial Intelligence*. 2017. p. C20-C24.
7. Tsai C., Lee Y. The parameters effect on performance in ANN for hand gesture recognition system. *Expert Systems with Applications*. 2011, №38 (7). p. 7980-7983.
8. Ganakwar D.G., Kadam, V.K. Face Detection Using Boosted Cascade of Simple Feature. *2019 International Conference on Recent Advances in Energy-efficient Computing and Communication (ICRAECC)*. 2017. p. A35-A39.
9. Viola P., Jones M.J. Robust real-time face detection. *International Journal of Computer Vision*, № 57 (2). 2014. p.137-154.
10. Alorf A.A. Performance evaluation of the PCA versus improved PCA (IPCA) in image compression, and in face detection and recognition. *2016 Future Technologies Conference (FTC)*. 2016. p. 29-37.
11. Cascone L., et al. Touch keystroke dynamics for demographic classification. *Pattern Recognition Letters*. 2022. p. 19-26.
12. Alsultan A., Warwick K., Wei H. Non-conventional Keystroke Dynamics for user authentication. *Pattern Recognition Letters*, №89. 2017. p. 53–59.
13. Tsai C.J., Huang P.H. Keyword-based approach for recognizing fraudulent messages by keystroke dynamics. *Pattern Recognition*. 2020, № 98 (10). p. 67-70.
14. Kim J., Kang P. Freely typed keystroke dynamics-based user authentication for mobile devices based on heterogeneous features. *Pattern Recognition*. 2020, № 108. p. 107556-107564.

Kasiianenko D.V. USER AUTHENTICATION BASED ON KEYSTROKE DYNAMICS ANALYSIS

Modern methods of recognizing network service users based on the analysis of biometric characteristics for authentication are considered. It is noted that the problem of implementing automated authentication procedures in many cases shows low efficiency due to non-compliance with the regulations of the network protection strategy. It is stated that approaches based on the analysis of user biometric characteristics effectively limit unauthorized access to confidential data and network service. It is noted that keystroke dynamics analysis is the easiest way to determine biometric characteristics, which does not require the use of additional hardware within the user's work platform. A comprehensive technique based on the analysis of such parameters as the number of typing errors, intervals between pressing individual keys, time to hold individual keys, the presence of overlap between keys, the level of typing arrhythmia and typing speed. The formalization provided an opportunity to build a mathematical model based on the definition of targets for the accuracy of authentication of network service users and the load on the computing resource of the hardware and software complex of the network service. It is shown that this approach can be used on the one hand as the main security system, and on the other – at the level of integrated approach, in which the keyboard handwriting analysis subsystem effectively complements the authentication system based on login and password. An advanced technique is presented, which allows the adaptation of the authentication system based on biometric parameters, which takes into account the gradual change of the user's keyboard handwriting and automatically increases the efficiency of machine analysis based on large amounts of statistics.

Key words: network service, user authentication, biometric characteristics, keystroke dynamics, key-template, training set, extremum of the target function.

Лубко Д.В.

Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

Шаров С.В.

Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

Зінов'єва О.Г.

Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

ПРОЕКТУВАННЯ ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ РОБОТИ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ЛІНІЇ ПРИБИРАННЯ ГНОЮ НА ТВАРИННИЦЬКІЙ МОЛОЧНІЙ ФЕРМІ

Проектування імітаційної моделі роботи технологічної лінії прибирання гною на молочній фермі було проведено з використанням системи моделювання GPSS (General Purpose Simulating System). За допомогою GPSS ми можемо створювати моделі як у безперервному середовищі, так і в дискретному. Наша модель буде використана для проведення експериментального дослідження машини за різних сценаріїв. Експеримент буде супроводжуватися статистичним опрацюванням результатів. Це моделювання дасть можливість оцінити конструкцію та роботу системи до її втілення на фермі.

Розробленою моделлю генерується потік транзактів – так званих обслуговуваних заявок. У даному випадку транзакт – це порція гною від тварин. Транзакти обслуговуються каналами обслуговування (горизонтальний та похилий шинкові транспортери) та знищуються на виході з моделі. Обстеження роботи гноприбирального транспортеру показали, що інтервали часу між подачею гною розподілені експоненційно з математичним очікуванням. Гній проходить спочатку через горизонтальний транспортер. Далі гній подається на похилий транспортер і через певний проміжок часу, розрахований в залежності від швидкості транспортера, видаляється з нього.

Розроблена нами програма дає у підсумку такі показники: число входів транзактів у кожен блок; коефіцієнт зайнятості апаратів обслуговування; готовність обладнання до подальшої роботи; кількість транзактів, що пройшли через кожен сегмент окремо і через всю програму.

Також було визначено, що при моделюванні роботи двох транспортерів завантаженість обох транспортерів знижується, та на горизонтальному транспортері накопичується менша кількість гною.

На підставі проведеного проектування імітаційної моделі технологічної лінії прибирання гною на тваринницькій фермі було визначено, що для оптимальної очистки гною на тваринницькій фермі при заданій кількості тварин, необхідно використовувати ще один гноеприбиральний транспортер.

Ключові слова: імітаційна модель, проектування, технологічна лінія, гной, молочна ферма, GPSS, транспортер, прибирання.

Постановка проблеми. Молочне скотарство є однією з провідних галузей сільського господарства, яка відіграє важливу роль у гарантуванні економічної та продовольчої безпеки держави [1]. Ефективний розвиток молочного скотарства дуже важливий для належного функціонування молокопродуктового комплексу та забезпечення продовольчої безпеки держави. Значення молока важко переоцінити. Серед величезної кількості продуктів тваринного і рослинного походження найбільш досконалим і найбільш цінним стосовно харчового та біологічного поглядів є молоко та молочні продукти.

На сучасному етапі економічного розвитку країни необхідно змінити існуючу зараз нега-

тивну тенденцію падіння виробництва молока. Для того щоб вітчизняне молочне скотарство було рентабельним, конкурентоспроможним і забезпечувало продовольчу незалежність, воно повинно бути високопродуктивним [2, с. 58].

Утримання корів та виробництво молока є наразі не достатньо ефективним через занадто низькі ціни реалізації та занадто високу виробничу собівартість молока, спричинену в першу чергу відсутністю достатнього власного кормовиробництва, фізично та морально зношеним обладнанням та технікою, недосконалою законодавчою базою, несприятливим інвестиційним кліматом в країні, несприятливими економічними, соціальними та політичними складовими [3, с. 34].

Наразі на ринку молока в Україні склалася нестабільна ситуація протягом останніх років. Негативним явищем є зниження купівельної спроможності українців унаслідок дії системи економічних та політичних факторів у країні. Вихід на світові ринки молочної продукції ускладнюється незадовільними показниками якості вітчизняної молочної продукції та невідповідністю міжнародним стандартам. Також негативно вплинуло на розвиток галузі відсутність діючої державної підтримки виробників молока, руйнування системи матеріально-технічного забезпечення. Одним з головних шляхів зростання ефективності виробництва продукції тваринництва, подальшого підвищення його продуктивності та якості кінцевого продукту є індустріалізація цього виробництва, що базується на комплексній механізації. Використання індустріальних методів виробництва у тваринництві вимагає удосконалення технологічних та технічних рішень [4, с. 86].

Видалення гною – це завжди нагальне завдання для всіх тваринницьких комплексів. Це один із найважливіших факторів підтримки задовільного мікроклімату на молочнотоварній фермі. Грамотно організована й втілена у життя система прибирання гною дозволяє витримувати санітарно-гігієнічні норми в приміщенні, благотворно впливає на стан працівників і тварин, а відповідно, й на показники якості молока і м'яса. Цю субстанцію потім можна використати у рослинництві як першокласне добриво. Відтак, потрібні деякі засоби механізації при поводженні з гноем, і насамперед це – ланцюгові шкребкові конвеєри чи транспортери.

Устаткування для видалення гною вибирають у господарстві, враховуючи такі критерії, як тип кормів, що даються худобі у конкретному фермерському господарстві, умови, в яких утримуються тварини, якість і хімічний склад води та матеріалу для підстилки (солома, тирса, тощо).

Відсутність у господарстві системи видалення гною, як підраховували експерти, приводить до близько 35-50% зайвих витрат на потреби з очищення стійл і кошар [8, с. 37]. Не варто забувати і про наступне: транспортувавши гній із тваринницької ферми у спеціальне сховище, після певної витримки ми матимемо якісне натуральне добриво. Розкидання його на полях скоротить витрати господарства на плекання прибуткових сільськогосподарських культур або ж зелених кормів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питанням перспектив розвитку молочного скотарства України та прибирання гною в свій час присвя-

тили свої праці такі дослідники, як: В.Г. Андрійчук, О.М. Васильченко, О.А. Волошина, Л.С. Запасна, М.В. Заходим, М.Й. Малік, В.Я. Месель-Веселяк, М. В. Місюк, Т. Л. Мостенська, В.С. Пономаренко, О.М. Тридід, М.О. Кизим, П.Т. Саблук, А.А. Шевченко, Ю.П. Ковальчук, тощо.

Проте сучасне становище цієї галузі визначає необхідність дослідження та пошук рішень щодо виявлення резервів розвитку як молочного скотарства як галузі, так і проблематиці якісного прибирання гною на фермах, які забезпечать стійкий розвиток галузі та задоволення потреб у якісній молочній та іншій продукції для населення України [10, 11, с. 170].

Також, не зважаючи на значну кількість праць присвячених вивченню проблематики прибирання гною на фермах, чимало питань залишаються досі невирішеними і потребують проведення подальших наукових досліджень.

Формулювання цілей статті. Основною метою даної статті є проектування імітаційної моделі роботи технологічної лінії прибирання гною на тваринницькій молочної фермі.

Виклад основного матеріалу. За період формування ринкових відносин молочне скотарство зазнало значних негативних кількісних і якісних змін, що охопили всі основні процеси, які характеризуються зменшенням поголів'я тварин, спадом виробництва, руйнуванням генетичного і виробничого потенціалу галузі, зниженням ефективності виробництва. Необхідність забезпечення населення продуктами харчування, зміцнення продовольчої незалежності країни визначає необхідність пошуку заходів, спрямованих на відновлення потенціалу галузі та сприяють розвитку молочного скотарства в нових умовах господарювання [5, с. 19].

Сучасні технології виробництва молока, які впроваджені на підприємствах, передбачають, крім сучасних технічних засобів, розробку нових та вдосконалення існуючих підходів до утримання, годівлі, догляду та прибирання гною для рогатої худоби молочного напрямку продуктивності [6, с. 53].

В умовах сучасного виробництва молока з'являється велика кількість новацій, які спрямовані на підвищення ефективності робочих процесів та разом із цим зменшення витрат. Автоматизовані, а в останні часи і роботизовані системи доїння, видалення гною, годівлі дорослих тварин і молодняку, контролю та керування мікрокліматом, систем управління стадом – ось далеко не повний перелік пропозицій на ринку послуг для тих, хто займається молочним скотарством.

Сама проблематика роботи технологічної лінії прибирання гною на тваринницькій молочній фермі має свої особливості.

Організоване прибирання гною у корівниках дозволяє підтримувати там правильні санітарно-технічні умови. Чистота в хлівах і на складі забезпечує якісну роботу обслуговуючого персоналу і сприяє функціональності всього тваринницького комплексу в цілому. Проектування різних пристроїв для збору гною і його зберігання має допомогти облаштувати агрокомплекси належним чином. При цьому враховується вид тварини, кормів і підстилки. Обов'язково потрібно будівництво окремого гноєсховища біля ферми.

Утримання великої рогатої худоби вимагає чималих зусиль у процесі очищення місць, де вони базуються. Прибирання складських приміщень теж повинно бути регулярним. Якщо цю діяльність запустити, то нечистоти будуть накопичуватися з посиленою швидкістю по всіх площах. Така ситуація викликає незручності у персоналу при роботі з худобою [8, с. 67]. Якщо присутня антисанітарія, то це великий ризик розвитку захворювань у тварин і людей. Ці проблеми є першочерговими і повинні підштовхувати власників ферм споруджувати системи видалення гною в корівниках. Також гній є хорошим добривом і збагачує ґрунт азотом, фосфором, калієм [7, с. 24]. Його використання в особистих угіддях допомагає уникнути додаткових витрат. Також можна налагодити збут відходів життєдіяльності, що дасть додатковий прибуток агрокомплексу (фермі).

Саме тому тема проектування імітаційної моделі роботи технологічної лінії прибирання гною на тваринницькій молочній фермі є дуже актуальною.

Основна частина. Стримуючими факторами розвитку молочного скотарства в Україні є низький рівень закупівельних цін; труднощі з капітальним будівництвом та модернізацією ферм і приміщень через невивідність кредитної політики фінансових установ для аграріїв; низький рівень інтеграції виробництва та переробки молочної продукції; невисока концентрація поголів'я корів на підприємствах; використання традиційних застарілих технологій у виробництві сировини та інші.

У сучасних умовах господарювання необхідно, як ми вважаємо, підвищити рівень інтенсифікації, яка підвищить ефективність функціонування галузі молочного скотарства. Подальший розвиток галузі необхідно розглядати системно й комплексно, а тому необхідно визначитися із чинниками розвитку галузі молочного скотарства України. Основні чинники розвитку галузі молочного скотарства наведені на рисунку 1 [4, с. 183].

Розглянемо більш докладно системи гноєвидалення на фермах великої рогатої худоби та сам сенс видалення гною.

Різні пристосування для видалення гною з корівника настільки вдосконалені, що виконують роботу набагато якісніше і швидше, ніж ручним способом. Кожен комплекс може підібрати підходящу систему, в залежності від масштабів виробництва.

Для побудови імітаційної моделі технологічної лінії прибирання гною на тваринницькій фермі була використана система моделювання GPSS* (General Purpose Simulating System), розроблена компанією Minuteman Software у 1993 році. За допомогою GPSS World можна створювати моделі як у безперервному середовищі, так і в дискретному. Модель може бути використана для проведення експериментального дослідження машини за різних сценаріїв. Експеримент супроводжу-



Рис. 1. Чинники розвитку галузі молочного скотарства

ється статистичним опрацюванням результатів. Моделювання дає можливість оцінити конструкцію та роботу системи до її втілення на фермі.

Моделлю генерується потік транзактів – обслуговуваних заявок. У даному випадку транзакт – це порція гною від тварин. Транзакти обслуговуються каналами обслуговування (горизонтальний та похилий шнекові транспортери) та знищуються на виході з моделі.

*Примітка [9]: GPSS (англ. General Purpose Simulation System – це система моделювання загального призначення) – мова моделювання, що використовується для імітаційного моделювання різних систем, в основному систем масового обслуговування. Широко використовується на вирішення практичних завдань. Динамічним елементом моделі є транзакт - абстрактний об'єкт, який переміщується між статичними елементами, відтворюючи різні події реального об'єкта, що моделюється. У процесі роботи моделі накопичується статистика, що автоматично виводиться після завершення процесу моделювання.

Обстеження роботи гнопризбирального транспортеру показали, що інтервали часу між подачею гною розподілені експоненційно з математичним очікуванням, що дорівнює 8,6 хв.

Гній проходить спочатку через горизонтальний транспортер. Далі гній подається на похилий транспортер і через певний проміжок часу, розрахований в залежності від швидкості транспортера, видаляється з нього.

Число тварин на фермі становить 200 голів. Продуктивність роботи транспортера – 4,5 т/год. Швидкість скребкового транспортера 0,72 м/с.

Час роботи транспортера за зміну 2,4 год.

Лістинг коду програми № 1 наведено нижче:

GENERATE (Exponential(1,0,8.6)) ; подача гною
 SEIZE Horyz ; завантаження гною на горизонтальний транспортер
 ADVANCE 15,2
 RELEASE Horyz
 SEIZE Pohyl ; завантаження гною на похилий транспортер
 ADVANCE 20,5
 RELEASE Pohyl
 TERMINATE
 GENERATE 160
 TERMINATE 1
 START 1

Така програма дає у підсумку такі показники:

- число входів транзактів у кожен блок;
- коефіцієнт зайнятості апаратів обслуговування;
- готовність обладнання до подальшої роботи;

– кількість транзактів, що пройшли через кожен сегмент окремо і через всю програму.

Лістинг коду результату роботи програми № 1 наведено нижче:

| NAME | VALUE | | | | | | | | |
|-------|-----------|-----------|------|-------|-------|---------|-------|-------|--|
| HORYZ | 10000.000 | | | | | | | | |
| POHYL | 10001.000 | | | | | | | | |
| LABEL | LOC | BLOCK | TYPE | ENTRY | COUNT | CURRENT | COUNT | RETRY | |
| | 1 | GENERATE | | 22 | 0 | 11 | 0 | 0 | |
| | 2 | SEIZE | | 11 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| | 3 | ADVANCE | | 11 | 1 | 0 | 0 | 0 | |
| | 4 | RELEASE | | 10 | 2 | 0 | 0 | 0 | |
| | 5 | SEIZE | | 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| | 6 | ADVANCE | | 8 | 1 | 0 | 0 | 0 | |
| | 7 | RELEASE | | 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| | 8 | TERMINATE | | 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| | 9 | GENERATE | | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| | 10 | TERMINATE | | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | |

| FACILITY | NTRIES | UTIL. | AVE.TIME | AVAIL. | OWNER | PEND | INTER | RETRY | DELAY |
|----------|--------|-------|----------|--------|-------|------|-------|-------|-------|
| HORYZ | 11 | 0.991 | 14.411 | 1 | 12 | 0 | 0 | 0 | 11 |
| POHYL | 8 | 0.888 | 17.750 | 1 | 9 | 0 | 0 | 0 | 2 |

| FEC | XN | PRI | BDT | ASSEM | CURRENT | NEXT | PARAMETER | VALUE |
|-----|----|-----|---------|-------|---------|------|-----------|-------|
| 24 | 0 | | 161.183 | 24 | 0 | 1 | | |
| 12 | 0 | | 166.212 | 12 | 3 | 4 | | |
| 9 | 0 | | 177.865 | 9 | 6 | 7 | | |
| 25 | 0 | | 320.000 | 25 | 0 | 9 | | |

Зі звіту видно, що через транспортер пройшло 8 подач гною. Горизонтальний транспортер був завантажений на 99,1%, похилий – на 88,8%, при цьому деяка кількість подач гною не пройшла через похилий транспортер. Це свідчить про накопичення гною на горизонтальному транспортері та його перезавантаженість.

При моделюванні роботи двох транспортерів завантаженість обох транспортерів знижується, та на горизонтальному транспортері накопичується менша кількість гною.

Лістинг коду результату роботи моделювання роботи двох транспортерів наведено нижче:

| STORAGE | CAP. | REM. | MIN. | MAX. | ENTRIES | AVL. | AVE.C. | UTIL. | RETRY | DELAY |
|---------|------|------|------|------|---------|------|--------|-------|-------|-------|
| HORYZ | 2 | 2 | 0 | 2 | 17 | 1 | 1.651 | 0.825 | 0 | 0 |
| POHYL | 2 | 0 | 0 | 2 | 17 | 1 | 1.360 | 0.680 | 0 | 0 |

| FEC | XN | PRI | BDT | ASSEM | CURRENT | NEXT | PARAMETER | VALUE |
|-----|----|-----|---------|-------|---------|------|-----------|-------|
| 17 | 0 | | 162.373 | 17 | 6 | 7 | | |
| 19 | 0 | | 164.481 | 19 | 0 | 1 | | |
| 18 | 0 | | 171.614 | 18 | 6 | 7 | | |
| 20 | 0 | | 320.000 | 20 | 0 | 9 | | |

Результати: на підставі проведеного проектування імітаційної моделі технологічної лінії прибирання гною на тваринницькій фермі було визначено, що для оптимальної очистки гною на тваринницькій фермі при кількості тварин 200 голів, необхідно використовувати ще один гноєприбиральний транспортер.

Висновки. Виконано проектування імітаційної моделі роботи технологічної лінії прибирання гною на тваринницькій молочній фермі за допомогою системи моделювання GPSS.

На підставі проведеного проектування імітаційної моделі технологічної лінії прибирання гною на тваринницькій фермі було визначено, що для оптимальної очистки гною на тваринницькій фермі при кількості тварин 200 голів, необхідно використовувати ще один гноєприбиральний транспортер.

Список літератури:

1. Світовий ринок молока і місце України на ньому – Режим доступу: <http://agronews.ua/node/69825> – Назва з екрана. – Дата звернення: 11.04.22.
2. Іванова А.С. Молочне скотарство: сучасний стан та проблеми вирішення. Агросвіт. 2017. № 22. С. 57-63.
3. Петриненко О.А. Аналіз тенденцій розвитку галузі молочного скотарства в ланці молокопродуктового ланцюга. Економіка АПК. 2018. №5. С. 33-40.
4. Економіка виробництва молока і молочної продукції в Україні: монографія / за ред. П.Т. Саблука, В.І. Бойка. Київ: ННЦ ІАЕ, 2005. 340 с.
5. Аверчева Н.О. Підвищення якості молока як основа конкурентоспроможності продукції на Європейському ринку. Агросвіт. 2019. №22. С. 19-30.
6. Заходим М. В. Сучасний стан і тенденції розвитку молочного скотарства в Україні. Економіка та інноваційний розвиток національного господарства. 2016. № 1–2. С. 53–58.
7. Асташов Н.Є., Слюсарев І.М. Механізація тваринництва. -М: Колос, 1992. 290 с.
8. Мельников С.В. Технологічне обладнання тваринницьких ферм та комплексів. Л. : Агропромиздат, 1985. - 640с.
9. GPSS – Режим доступу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/GPSS> – Назва з екрана. – Дата звернення: 11.04.22.
10. Лубко Д.В., Зінов'єва О.Г., Шаров С.В. Розробка інформаційно-довідкової системи агронома для ефективного вирощування соняшника в Україні. Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного. Мелітополь: ТДАТУ, 2020. Вип. 10, том 2.
11. Лубко Д.В., Шаров С.В. Розробка інтелектуальної інформаційної системи для птахівництва. Системи обробки інформації: Збірник наукових праць // Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба. – Вип. 4 (150). Харків, 2017. С. 170-174.

Lubko D.V., Sharov S.V., Zinovieva O.H. DESIGN OF THE SIMULATION MODEL OF WORK OF THE TECHNOLOGICAL LINE OF CLEANING OF MANURE ON THE ANIMAL DAIRY FARM

The design of a simulation model of the technological line of manure collection on a livestock dairy farm was carried out using the GPSS modeling system (General Purpose Simulating System). With GPSS World, we can create models in both continuous and discrete environments. Our model will be used to conduct an experimental study of the machine in different scenarios. The experiment will be accompanied by statistical processing of the results. This simulation will allow to evaluate the design and operation of the system before its implementation on the farm.

The developed model generates a flow of transactions – the so-called service requests. In this case, the transaction is a portion of manure from animals. Transactions are served by service channels (horizontal and inclined screw conveyors) and are destroyed at the exit of the model. Surveys of the manure conveyor have shown that the time intervals between the manure supply are distributed exponentially with mathematical expectations. The manure passes first through a horizontal conveyor. Then the manure is fed to the inclined conveyor and after a certain period of time, calculated depending on the speed of the conveyor, is removed from it.

The program developed by us gives the following indicators: the number of transaction entries in each block; employment rate of service devices; readiness of equipment for further work; the number of transactions that passed through each segment separately and through the entire program.

It was also determined that when modeling the operation of two conveyors, the load of both conveyors is reduced, and less horizontal manure accumulates on the horizontal conveyor.

Based on the design of the simulation model of the technological line of manure collection on the livestock farm, it was determined that for optimal cleaning of manure on the livestock farm with a given number of animals, it is necessary to use another manure conveyor.

Key words: *simulation model, design, technological line, manure, dairy farm, GPSS, conveyor, cleaning.*

Окунькова О.О.

Державний університет «Житомирська політехніка»

ВІЗУАЛІЗАЦІЯ ДАНИХ. ВІД ПРОСТОГО ДО СКЛАДНОГО

Стаття присвячена дослідженню існуючих на сьогодні методів та програмних засобів візуалізації даних.

Стрімкий розвиток інформаційних технологій значно збільшив кількість інформації, яку сучасна людина повинна сприйняти та опрацювати. Стає відчутною проблема в якісному представленні великих обсягів інформації. Зважаючи на фізіологічну особливість людини краще сприймати візуальну інформацію, графічне представлення даних, на відміну від таблиць та текстів значно підвищує ефективність її сприйняття, залучення уваги і утримання інтересу.

У статті доведено, що якісна візуалізація забезпечує користувачеві можливість інтуїтивного розуміння представлених даних, отримання необхідних знань та їх аналіз, здатність донести свою думку, спростити процес прийняття рішень та управління ситуацією.

Результати дослідження визначають головну перевагу візуалізації, яка полягає в значному спрощенні передачі знань засобом наглядного представлення суті питання, що схоже на класичний звіт про деяку ситуацію чи об'єкт.

Проведений у статті аналіз свідчить, що програмні засоби для візуалізації інформації вірізняються великою різноманітністю. Одні з них є досить простими і не потребують великого обсягу спеціальних знань, інші більш складні і комплексні. Традиційним є використання програми Microsoft Excel та інших електронних таблиць, які у своєму арсеналі мають декілька інструментів для ефективного аналізу даних засобом візуалізації. Як правило з даним програмним продуктом знайома переважна більшість користувачів інформаційних технологій, що значно спрощує набуття практичних навичок візуалізації табличних даних. Але функціонал засобів графічного представлення даних електронних таблиць досить обмежений.

З'ясовано, що в інтернет-просторі існує ряд сервісів для створення презентацій, анімацій, банерів, інфографіки, звітів, форм і іншого візуального контенту. Такі програми містять багато шаблонів, зображень, що дозволяють зробити візуалізацію привабливою, зрозумілою та цікавою. В більшості з них основні функції доступні в безкоштовному та онлайн режимі.

Дослідження у цьому напрямі дозволяють стверджувати, що для досягнення максимального ефекту слід використовувати спеціалізоване програмне забезпечення, найпопулярнішим з якого є MS Excel, Tableau, MS Power BI і сімейство Qlik.

Ключові слова: візуалізація даних, дашборд, спарклайн, інфографіка, лінії тренду, таймлайн, сторітеллінг, картограма, ментальні карти.

Постановка проблеми. Вміння працювати з великими обсягами інформації одна з необхідних компетентностей сучасного фахівця будь якої сфери. Візуалізація даних може бути одним з найкращих способів опрацювання інформації, приведення її до простого і зрозумілого представлення для подальшого використання. На сьогодні комп'ютерні технології надають надзвичайно різноманітний набір методів і засобів обробки інформації. Від раціонального підходу до розробки візуалізації даних залежить оптимальне представлення інформації та ефективне її використання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У наш час питання візуалізації даних є актуальним і затребуваним, про що свідчить наявність великої кількості програмних сервісів та публікацій.

Так, Каїро Альберто у своїй книзі «Функціональне мистецтво: вступ до інфографіки та візуалізації» поєднує теорію і практику з візуалізації будь-якої інформації просто і зрозуміло [6].

Автор Базалева О. розповідає читачам, як складне показати простим, а громіздке зробити легким та прозорим. Для аналітиків і маркетологів пропонує багато готових ідей, шаблонів та інструментів, а керівникам пояснює, як має виглядати справді якісна візуалізація даних [1].

Скотт Берінато стверджує, що ефективну діаграму або графік можна впізнати відразу, бо їх зміст та значення стають зрозумілими з першого погляду [2].

Д. Желязни у своїй книзі «Говори на мові діаграм» надає практичні рекомендації з вибору та правил

оформлення діаграм; визначення типу порівняння; пояснює значення спецефектів; демонструє на прикладах створення оптимальної візуалізації даних засобами графіків і діаграм для утримання уваги та забезпечення однозначності розуміння даних [5].

Формулювання цілей статті (постановка завдання). Метою статті є дослідження методів та програмних засобів візуалізації даних.

Виклад основного матеріалу. З кожним днем невпинно зростає кількість інформації, яку необхідно сприйняти та опрацювати кожній людині. Ресурс людської уваги досить обмежений, тому візуальне представлення даних стає все актуальнішим. Унаслідок розвитку комп'ютерних технологій з'являються нові програмні інструменти та вдосконалюються раніше створені, що дозволяє робити візуалізацію даних більш ефективною. А збільшення функціоналу програмного забезпечення зумовлює появу нових інтерактивних методів візуалізації інформації.

Візуалізація – це графічне представлення інформації та даних. Перевагами цього процесу є: більш якісна та концентрована подача інформації і, відповідно, зменшення інформаційного навантаження, значне прискорення сприйняття, запам'ятовування та розуміння інформації, спрощення процесу утримання уваги та переконання, виділення взаємозв'язків між даними, естетична привабливість. Візуалізація – надзвичайно потужний інструмент, який потребує виваженого підходу до вибору методів та засобів її розробки та вибору даних, які підлягають графічному оформленню.

Для створення якісної візуалізації даних слід дотримуватись простих правил.

1. Вибрати правильний метод (тип) візуалізації.
2. Дизайн не повинен спотворювати інформацію.
3. Дані мають розміщуватися в логічному порядку.
4. Текст, зображення, графіки повинні відповідати принципу ненадлишковості.
5. Дані для порівняння розміщуються на одному графіку чи діаграмі.

На початку розробки візуалізації даних важливо розуміти що і для кого ви робите, чітко окресливши мету проекту. Необхідною умовою якісної візуалізації є правильний вибір методу створення таких зображень, які будуть ілюструвати зв'язок між даними, що зображуються, тим самим роблячи їх очевидними і зрозумілими для користувача. Пошук правильного методу візуалізації варто розпочинати з найпростіших поступово переходячи до складніших, якщо не вдається досягнути поставленої мети [10].

На основі проведеного дослідження виділені найбільш оптимальні методи візуалізації даних та програмні засоби, які дозволяють їх реалізувати.

1. Умовне форматування. Це функція електронних таблиць, яка дозволяє наочно представити табличні дані відповідно до заданих умов чи правил. Встановлення таких умов полегшить сприйняття та розуміння даних та допоможе в ефективному аналізі. Варіанти форматування включають зміни кольору шрифту та фону, стилі шрифту, використання гістограм, кольорових шкал, наборів значків. Також є можливість створювати власні правила відображення даних, застосовуючи до них декілька правил умовного форматування.

2. Спарклайни – це маленькі діаграми, що вміщуються в одну клітинку таблиці MS Excel. Дозволяють відобразити тренди безпосередньо поруч з даними. Ці міні-діаграми, не зважаючи на свій розмір, дають можливість продемонструвати тенденцію даних в зрозумілому і компактному, графічному вигляді, до того ж вони забезпечують значну економію робочого листа. При зміні даних спарклайни автоматично змінюються.

3. Графіки і діаграми. Це найпоширеніші засоби візуалізації даних [5].

Діаграма – графічне представлення числових даних з метою їх порівняння.

Графік – графічне відображення тенденцій протягом певного часу або порядку категорій.

Вибір виду діаграми залежить від особливостей інформації, її кількості та поставленої мети.

Так, для створення порівняльної діаграми, аналізу тенденцій слід використовувати гістограми, лінійні діаграми, з областями, точкові. При цьому слід пам'ятати, що гістограми використовуються для невеликої кількості даних. Коли даних багато краще використати лінійну діаграму. Для ілюстрації структури бажано використовувати кругові діаграми та з накопиченням [13].

У даний час існує багато інструментів та засобів для побудови графіків та діаграм. Найвідомішою програмою є MS Excel. Разом з тим в інформаційному просторі існують програми завдяки яким можна розширити можливості візуалізації даних методами графіків і діаграм [15]. Зокрема:

– Graph – безкоштовна програма для побудови та редагування графіків з великою кількістю вхідних параметрів. Дозволяє імпортувати дані з MS Excel;

– Charts Builder – крім набору стандартних функцій створення графіків і діаграм дає можливість задати розмір вихідного зображення;

– Google Data Studio – має приємний, інтуїтивно зрозумілий інтерфейс, велику кількість

інтеграцій як з сервісами Google (Analytics, Ads), так і сторонніми службами (Facebook Ads, CRM і т. д.); не потребує спеціальних знань і навичок;

– Raw – веб-додаток з простим інтерфейсом, безкоштовний;

– D3.js – безкоштовна, зручна і доступна для користувачів програма (бібліотека JavaScript). Яка дозволяє створювати незвичайні діаграми у форматах HTML, SVG та CSS, використовуючи різні джерела даних; має різні варіанти інтерактивної підтримки.

4. Лінії тренду – графічне представлення тренду або напрямку зміни даних в динамічному ряді. Головним завданням лінії тренду є можливість скласти по ній прогноз подальшого розвитку подій на конкретний часовий період. Належать до функцій електронних таблиць. Дозволяють графічно відображати тенденції даних та здійснювати прогнозування, можуть бути побудовані на всіх двовимірних діаграмах без накопичення (гістограми, лінійній, точковій та бульбашковій діаграмі, графіку). Лінії тренду не можуть бути побудовані на об'ємних, пелюсткових кругових діаграмах.

5. Дашборд – це інтерактивна панель із важливою інформацією, що згрупована на одному екрані. Мета дашборду – компактно розмістити аналітичну інформацію на одній сторінці.

Дашборди – це інтерактивні панелі управління, що відображають дані в реальному часі. Після створення дашборду користувач не може змінювати в ньому інформацію, на відміну від класичних таблиць та звітів.

Як правило фахівці виділяють три типи дашбордів:

1. Бізнес аналітика. Аналіз потреб, вимог, проблем та їх рішення.

2. Моніторинг. Відстеження та оцінка ефективності роботи.

3. Відстеження станів та контроль процесів.

Компанія Tableau, розробник програмного забезпечення для інтерактивної візуалізації даних, склала основні рекомендації для створення ефективних дашбордів: продумане планування, інформативний дизайн, критичний погляд на структуру, дизайн та зміст інформації.

Дашборди будуть корисними для маркетологів, власників інтернет магазинів з великим потоком товару, працівники складів будь-якого масштабу, соціологів, менеджерів, керівників для прийняття управлінських рішень.

Найчастіше для створення дашбордів використовують MS Excel, Power Bi, Tableau, Google Data

Studio. Побудову дашбордів найкраще почати в MS Excel на основі зведених таблиць

6. Інфографіка або інформаційна графіка – це графічне візуальне подання інформації, сукупності даних, предметних знань, теорій, ілюстрації різних подій з метою структурованого відображення комплексної інформації для швидкого сприйняття та засвоєння. Як правило, це набір зображень, графіків і мінімальної кількості тексту. Головна перевага інфографіки в тому, що вона дозволяє пояснити складне просто. Важливо пам'ятати, що візуальні складові інфографіки повинні не тільки подобатись чи захоплювати, а й допомагати користувачу розуміти і запам'ятовувати зміст. Для роботи з елементами інфографіки необов'язково мати здібності дизайнера.

Для створення інфографіки можна використовувати програмне забезпечення таке, як CorelDraw, Adobe Illustrator, Inkscape, Corel Designer, Corel Painter, Adobe Photoshop, Gimp. Початківці можуть скористатися рядом сервісів, які навіть не завжди потребують встановлення на персональний комп'ютер. Прикладами таких програм є [8]:

– Pictochart.com – онлайн-редактор інфографіки для представлення даних у візуально-графічній формі;

– Infogr.am – онлайн-сервіс для створення інтерактивних візуалізацій та інфографіків;

– Visual.ly -має ряд безкоштовних тем для створення інфографіки;

– Easel.Ly – має більш сучасний стиль графіки та шрифтів та діє за принципом Drag and Drop;

– Draw.io – онлайн-сервіс для створення та редагування інфографіки.

7. Таймлайн, або лінія часу – це окремий вид інфографіки, який дозволяє виставити події в хронологічному порядку, представляючи їх у гарному та зручному вигляді з додаванням зображень, описів, фотографій, відео тощо. Найчастіше їх представляють у вигляді горизонтальної чи вертикальної лінії з розміткою по періодах (датах, етапах) із зазначенням ситуації. Відмінною рисою таймлайн є його інтерактивність. Таймлайни дозволяють відстежувати ключові моменти, виявляти втрачені аспекти, здійснювати контроль кожного етапу. Для створення таймлайнів існує багато сервісів, найпопулярнішими з яких є:

– Meograph – інструменти ресурсу дозволяють створювати мультимедійне оповідання на основі комбінації новин, історій, фотозвітів з подорожей, картинок, відео, аудіофайлів, гіперпосилань, карт Google.

– Time Toast – це сервіс створення хронік, який володіє простим інтерфейсом і легкою інтеграцією з Facebook.

– Dripity – це безкоштовний веб-сайт для створення стрічок часу. Користувачі можуть створювати власні стрічки часу, які включають відео, аудіо, зображення, текст, посилання, місцезнаходження і тимчасові мітки.

– Tiki-Toki – ресурс для створення стильних інтерактивних хронік з використанням 3D технології.

8. Інтерактивний сторітелінг. Сторітеллінг – технологія створення історії за допомогою необхідної інформації, представленої засобами схем, графіків, зображень, текстів.

У процесі створення сторітеллінгу враховується особливість людей сприймати візуалізовані розповіді значно легше, ніж звичайні, навіть якщо вони доповнені аргументами та фактами; вони є більш цікавими та зрозумілими. Метод сторітеллінгу вдало використовують педагоги, психологи, менеджери, маркетологи та інші спеціалісти для залучення уваги, розвитку уяви, логіки та побудови якісних взаємовідносин.

Сторітеллінг базується на таких компетенціях як професійні знання, ораторське мистецтво, психологія. Його головна перевага полягає в тому, що цікава розповідь є потужним інструментом впливу [11].

Для створення цифрових історій можна скористатися програмами:

– ZooBurst – веб-сервіс, який дозволяє створювати власні віртуальні тривимірні книжки, при цьому є можливість використовувати близько 10 000 безкоштовних зображень;

– Narrable – дозволяє досить просто створювати цифрові історії. Особливо цікаво, що звук можна записувати та накладати на зображення у самій програмі;

– Zimmertwinsatschool дозволяє створювати мультиплікаційні історії на основі наявних шаблонів;

– Metta – програма для створення відеолекцій та цифрових історій на основі тексту, зображень і відео;

– PowToon, Moovly – сервіси анімованих презентацій.

9. Картограма – це спосіб картографічного зображення, що візуально показує інтенсивність будь-якого показника в межах території на карті. Дані можуть наноситися на карту штрихуванням різної густоти, забарвленням певного ступеня насиченості або крапками. Це універсальний та зручний інструмент для роботи з відповідною інформацією [12].

Уміння працювати з картографіями особливо актуальне для спеціалістів які працюють з статистичними та економічними показниками, виявляють закономірності, повідомляють про події, порівнюють досвід різних регіонів та країн. Для створення картограм призначені сервіси:

– DataWrapper – сервіс для створення мап та графіків. Простий у використанні. Для створення мапи слід завантажити дані (з Excel, PDF, CSV), вибрати карту, перенести дані;

– BatchGeo – створює карту у декілька простих кроків: спершу потрібно скопіювати дані з файлу Excel та додати у програму підібравши необхідний шаблон;

– Mapbox – безкоштовний додаток, який має декілька функцій: створення карт, геокодування, встановлення напрямків/маршрутів в режимі онлайн; є можливість додавати фотоматеріали до карти;

– Map a list – безкоштовний додаток, який дозволяє створити картограму в два кроки: додати інформацію та обрати шаблон. Його перевага – створений для синхронізації з Google Earth;

– Mapreo – онлайн-сервіс, який надає можливість відстежувати відео з геокодуванням. Дозволяє швидко переглядати відео з місця подій, отримувати підтвердження потрібної інформації тощо.

10. Ментальні карти – це графічне подання інформації в зручній для людського сприйняття формі: логічних і асоціативних деревоподібних схемах, що допомагає швидко запам'ятовувати і осмислювати інформацію. Особливий ефект від використання ментальних карт спостерігається при засвоєнні нового матеріалу. У процесі створення ментальну карту можна доповнювати зображеннями, фотографіями, вигнутими та різнокольоровими лініями. Суть методу полягає в тому, що ключова ідея знаходиться в центрі і від нього розходяться гілки з відповідною деталізацією. Як правило, пов'язані частини інформації поєднуються кольором чи фоном, що дозволяє встановити взаємозв'язки між об'єктами. В результаті структурно-логічна схема стає легкою для розуміння і запам'ятовування [14].

Майкл Дж. Гелб у своїй книзі «Думати як Леонардо да Вінчі» пояснює, що при частому використанні ментальних карт, людина вчиться мислити логічно, творчо, результативно. Одним з аргументів наведених є те, що стилі нотаток багатьох видатних людей мають специфічну структуру, доповнену безліччю символів, ключових слів [4]. Для створення ментальних карт можна скористатися сервісами:

– FreeMind – безкоштовний сервіс для створення діаграм зв'язків (карт пам'яті);

– MindMeister – інтуїтивно зрозумілий, простий редактор схем для зображення будь-яких ідей, проведення мозкових штурмів у реальному часі між необмеженою кількістю користувачів, планування проєктів. Є можливість експортувати до MS Word, PowerPoint, PDF, PNG та інші формати;

– Mindomo – простий і водночас має всі основні функції сервісів з інтелект-карт. Є «режим відтворення», який покаже, як було побудовано карту;

– SpiderScribe – безкоштовний сервіс, простий, підходить для особистого користування.

Висновки. На сьогодні, неможливо назвати жодної сфери діяльності людини, яка б не потребувала обробки та аналізу великих обсягів інформації. І з кожним днем кількість такої інформації тільки зростає. Питання спрощення сприйняття інформації, її структуризації, обробки та оформлення надзвичайно актуальні. Вирішити їх дозволяють технології візуалізації даних, які складаються з методів та засобів (інструментів) представлених програмним забезпеченням. Таких програм величезна кількість, тому проведене в роботі дослідження, сподіваюсь, стане в нагоді користувачам, яких цікавлять питання візуалізації даних.

Список літератури:

1. Базалева О. Мастерство визуализации данных. Диалектика, 2018. 192 с.
2. Берінато Скотт Хороші діаграми: Посібник. HBR, 2022. 288с.
3. Воронін А. М., Зіатдінов Ю. К., Климова А. С. Інформаційні системи прийняття рішень: навчальний посібник. К.: НАУ-друк, 2009. 136 с.
4. Гелб Майкл Дж. Думати як Леонардо да Вінчі. КМ-Букс, 2018. 224 с.
5. Желязни Д. Говори на языке диаграмм: Пособие по визуальным коммуникациям для руководителей. М.: Институт комплексных стратегических исследований, 2004. 220 с.
6. Каїро Альберто Функціональне мистецтво: вступ до інфографіки та візуалізації. Видавництво Українського Католицького Університету, 2017. 350 с.
7. Симмонс А. Сторителлінг. Как использовать силу историй. М.: Манн, Иванов и Фербер, 2013. 272 с.
8. Топ 10 бесплатных сервисов для создания инфографики. URL: <https://web-academy.com.ua/stati/283-top-10-servisov-dlya-infografiki> (дата звернення 9.04.2022).
9. 5 зручних сервісів для створення стрічок часу. URL: <https://naurok.com.ua/post/5-zruchnih-servisiv-dlya-stvorennya-strichok-chasu> (дата звернення 9.04.2022).
10. Як і для чого використовувати візуалізацію даних?. URL: <http://eidos.org.ua/novyny/yak-i-dlya-chohovkorystovuvaty-vizualizatsiyu-danyh/> (дата звернення 10.04.2022)
11. Сторителлінг – ефективний метод навчання та виховання? URL: <https://sites.google.com/a/lyceum2.cv.ua/metodicnij-navigator/metodicni-materiali/storitelling> (дата звернення 13.04.2022).
12. Український центр суспільних даних. URL: <https://socialdata.org.ua/manual/manual6/> (дата звернення 13.04.2022)
13. Візуалізація даних. Графічний метод представлення даних. URL: https://stud.com.ua/120991/prirodnavstvo/vizualizatsiya_danih_grafichni_metodi_predstavleniya_danih (дата звернення 13.04.2022).
14. Mind mapping – новий шлях мислення і отримання нових знань. URL: <https://onua.edu.ua/ua/novyny-ua/novosti-universiteta/5378-2020-09-01-1> (дата звернення 13.04.2022).
15. 36 сервісів візуалізації даних. URL: <https://toplead.com.ua/ua/blog/id/38-luchshih-instrumentov-dlja-vizualizacii-dannyh-160> (дата звернення 14.04.2022).

Okunkova O.O. DATA VISUALIZATION. FROM SIMPLE TO COMPLEX

The article is devoted to the study of currently existing methods and software tools for data visualization. The rapid development of information technology has significantly increased the amount of information that present-day people must perceive and process. The problem of high-quality presentation of large amounts of information is becoming apparent. Due to the physiological characteristics of a common personality, it is better to perceive visual information, graphical representation of data, in contrast to tables and texts. It significantly increases the effectiveness of its perception, attention and interest.

The article proves that high-quality visualization provides the user with an intuitive understanding of the presented data, obtaining the necessary knowledge and analysis, the ability to convey their views, simplify the decision-making process and situation management.

The results of the study identify the main advantage of visualization, which is a significant simplification of knowledge transfer by means of visual representation of the essence of the issue, similar to a classic report on a situation or object.

The analysis conducted in the article shows that that software for visualization of information is very diverse. Some of them are quite simple and do not require a large amount of special knowledge, others are more complex. It is traditional to use Microsoft Excel and other spreadsheets, which have in their arsenal several tools for effective data analysis using visualization. As a rule, the vast majority of information technology users are familiar with this software product, which greatly simplifies the acquisition of practical skills in tabular data visualization. However the functionality of graphical representation of spreadsheet data is quite limited.

There is a number of services in the Internet for creating presentations, animations, banners, infographics, reports, forms and other visual content. Such programs contain many templates, images that make the visualization attractive, understandable and interesting. In most of them, the main features are available for free.

Therefore, to achieve maximum effect, you should use specialized software. The most popular software include MS Excel, Tableau, MS Power BI and the Qlik family.

Key words: *data visualization, dashboard, sparkline, infographics, trend lines, timeline, storytelling, cartogram, mental maps.*

УДК 65.011.56

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.3/11>**Проскурено Д.М.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Третьяк 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»

АВТОМАТИЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ПІДГОТОВКИ ОДИНИЧНОГО ТА ДРІБНОСЕРІЙНОГО ВИРОБНИЦТВА

У статті описано змодельований прототип технологічної підготовки дрібносерійного та одиничного типів виробництва. В даний час значна кількість продукції виготовляється в умовах одиничного і дрібносерійного виробництва, де найбільш помітна трудомісткість етапу ТПВ, що призводить до зниження продуктивності і збільшення обсягу виробництва. За рахунок впровадження автоматизації та моделювання виробничого процесу можливе зменшення комплексу технологічної підготовки виробництва. За мету взято проектування ділянки підприємства для механічної обробки. Проектована ділянка механічної обробки призначена для виготовлення як деталей, необхідних для ремонту, так і продукції кооперації в умовах дрібносерійного та одиничного виробництва. Базуючись на описаній моделі, було проведено визначення оптимального варіанта технологічного маршруту обробки партії деталей, величини змінних витрат, термінів виготовлення деталей, оптимальних технологічних параметрів процесу обробки та управління запасами складу, а також формування номенклатури та необхідної кількості засобів виробництва. Імітація була проведена на основі математичних моделей з керування запасами складу (комбінована модель) та формування величини змінних витрат і норми оперативного часу. Визначення оптимального варіанта виконується на основі багатокритеріального аналізу з використанням способу «ідеальної точки» за трьома параметрами: величина змінних витрат на виготовлення партії деталей, мінімальні терміни виготовлення партії деталей, тривалість виготовлення партії деталей. У ході проведеної роботи визначено, що застосування розробленої моделі дозволить скоротити тривалість ТПВ за рахунок її автоматизації, що слугуватиме значною конкурентною перевагою в умовах одиничного та дрібносерійного виробництва; застосування розробленої моделі дозволить забезпечити відсутність простоїв технологічного обладнання через відсутність на складах засобів виробництва, що необхідні для процесу обробки.

Ключові слова: автоматизація виробництва, обробка деталей, технологічна підготовка виробництва.

Постановка проблеми. Технологічна підготовка виробництва (ТПВ) є невіддільною стадією виробничого процесу виробництва продукції, яка вирішує такі завдання: аналіз конструкції деталі та постановка технологічних завдань; вибір метод отримання заготовки; розробка маршрутів технологічної обробки деталей; підбір технологічного обладнання; проектування структури технологічних операцій; розробка комплексу технологічної документації.

В даний час велика кількість продукції виробляється саме в умовах одиничного і дрібносерійного виробництва, де найбільш помітна трудомісткість етапу ТПВ, що призводить до зниження

продуктивності і збільшення обсягу виробництва. Зниження трудомісткості ТПВ можливе за рахунок сукупної автоматизації та моделювання виробничих процесів.

До одного з основних етапів технологічної підготовки відносяться побудова оптимальних технологічних маршрутів обробки, вибір параметрів процесу різання (швидкість різання, подача, глибина різання) та засобів технологічного оснащення (технологічне обладнання, ріжучий інструмент, установочно-затискні пристосування).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Автоматизація виробничих процесів, у тому числі й технологічної підготовки виробництва, сприяє

підвищенню ефективності роботи та конкурентоспроможності підприємства. У сучасних умовах автоматизація одна із основних напрямів оптимізації виробничих процесів [1].

Процес автоматизації технологічної підготовки виробництва, описаний у науковій літературі [2-6], здебільшого базується на принципі типізації конструкторських елементів та технологічних процесів. В умовах одиничного та дрібносерійного виробництва даний принцип не ефективний внаслідок великих витрат на виконання підготовчих робіт (розробка класифікаторів, типових та групових процесів та їх елементів) [7].

У науковій літературі за допомогою автоматизації процесу технологічної підготовки виробництва вирішуються такі завдання: вибір економічно доцільного варіанта на основі аналізу граничних витрат; прогноз собівартості та продуктивності виготовлення продукції; формування основи знань; управління ризиками; пошук альтернативних варіантів виготовлення деталей; вибір технологічного способу виготовлення деталей. Відомі моделі ТПВ не аналізують питання керування виробничими запасами, що вимагають вирішення наступних завдань: контролю за наявністю ресурсів (засобів виробництва), необхідні виробничого процесу з виготовлення деталей; визначення оптимальної величини партій постачання і термінів постачання ресурсів виключення їх дефіциту складі.

Постановка завдання. Мета цієї роботи – проектування ділянки механічної обробки в структурі приладобудівного підприємства. Проектована ділянка механічної обробки призначена для виготовлення як деталей, необхідних для ремонту, так і продукції кооперації в умовах дрібносерійного та одиничного виробництва.

У приладобудівному виробництві лише незначна частина часу (близько 15%) витрачається інженером-технологом на прийняття рішення, а решта – на пошук необхідної інформації та оформлення документації [8]. Таким чином, завданням нашого дослідження є розробка моделі, що дозволяє скоротити тривалість ТПВ в умовах одиничного та дрібносерійного виробництва.

Виклад основного матеріалу дослідження. При запланованих обсягах робіт з ремонту приладів завантаження виробничих потужностей механічного цеху є неповним, що компенсовано виготовленням деталей по кооперації. Номенклатура деталей, що виготовляються з кооперації, визначається технічними можливостями та завантаженням технологічного обладнання.

Модель технологічної підготовки виробництва в умовах дрібносерійного та одиничного типів виробництва. Розроблювана модель технологічної підготовки дрібносерійного та одиничного типів виробництва вирішує такі завдання:

1. Формування допустимих варіантів технологічних маршрутів опрацювання партії деталей.
2. Формування переліку засобів виробництва, необхідні виготовлення партії деталей.
3. Формування оптимальних технологічних параметрів процесу обробки (швидкість різання, подача, глибина різання).
4. Визначення розміру партії та ритму постачання необхідних ресурсів.
5. Визначення термінів виготовлення партії деталей та величини змінних витрат.
6. Вибір раціонального технологічного маршруту виготовлення партії деталей.

Схема моделі ТПВ, що розробляється, представлена на рис. 1.

Опис етапів моделювання. Розроблювану модель ТПВ можна поділити на три етапи. Перший етап заснований на застосуванні модульного принципу в машинобудуванні, під яким розуміють побудову різних технічних систем із різноманітними характеристиками шляхом комбонування їх із типових модулів обмеженої номенклатури.

На першому етапі моделювання вирішуються такі завдання:

1. Аналіз конструкції деталі та визначення технологічних завдань (точність розмірів, чистота поверхні, фізикомеханічні властивості).
2. Формування безлічі модулів поверхонь (МП), що утворюють контур деталі. Вибір моделей поверхонь для опису контуру деталі проводиться з множини стандартних МП, для яких визначено оптимальні методи формоутворення та технологічні параметри процесу різання.
3. Визначення доречних методів обробки модулів поверхонь залежно від типу та технічних характеристик наявного технологічного обладнання.
4. Формування модулів операцій (МО) та визначення комплектів ріжучого інструменту для кожного МО. Формування допустимих варіантів модулів поверхонь проводиться з урахуванням різних поєднань МП.

Схема першого етапу моделювання представлена рис. 2.

На другому етапі моделювання вирішуються такі завдання:

1. Формування допустимих технологічних маршрутів обробки. Технологічний маршрут обробки визначається, враховуючи розроблені МО.

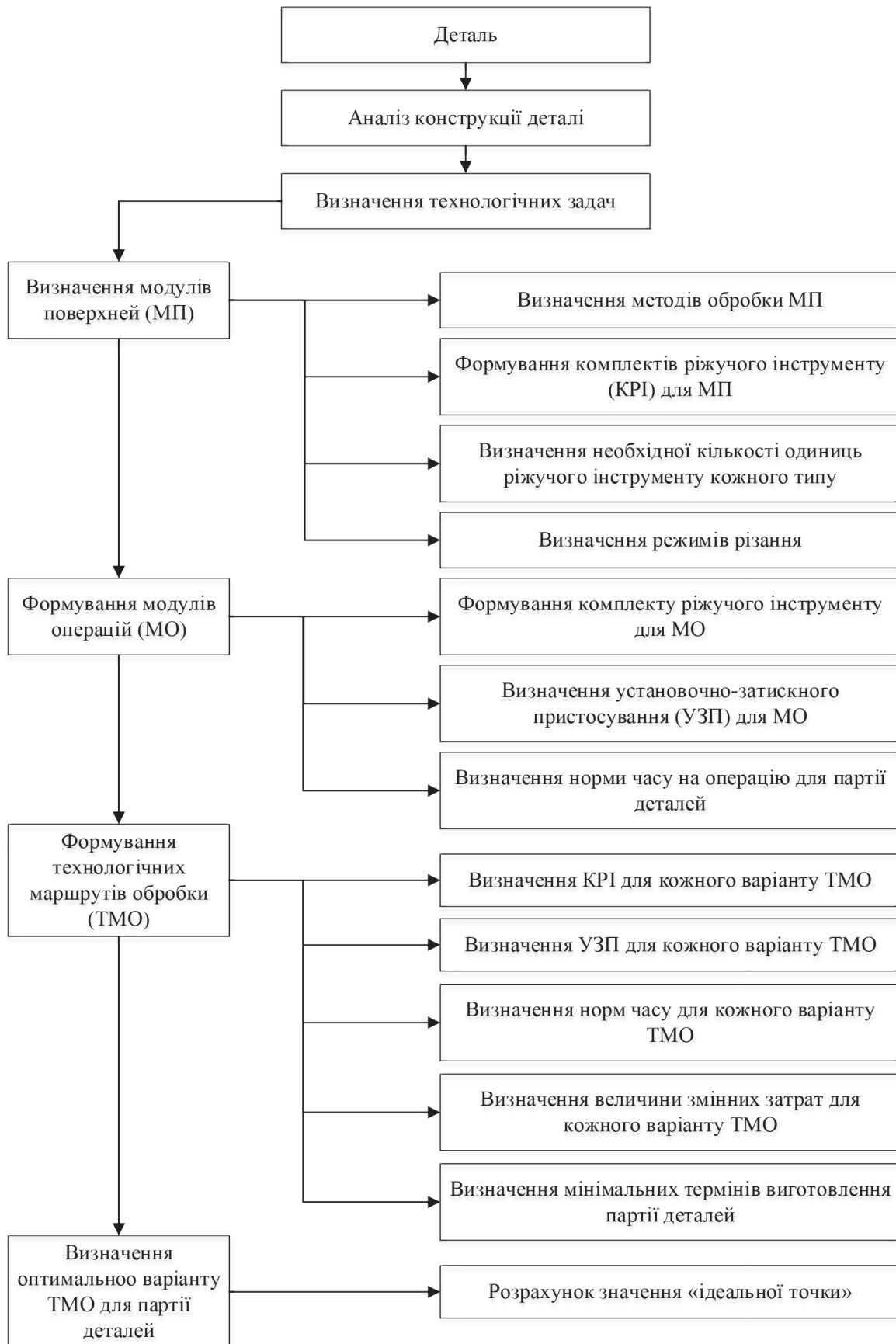


Рис. 1. Схема моделі технологічної підготовки виробництва

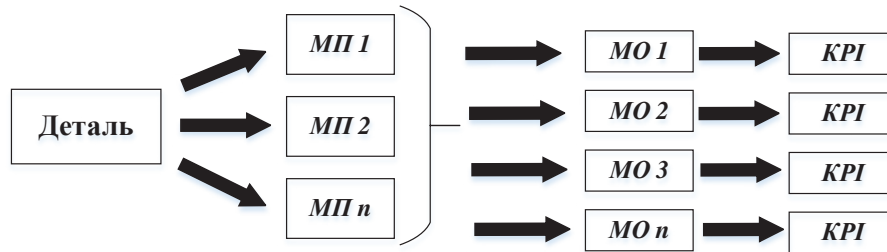


Рис. 2. Схема першого етапу моделювання

2. Визначення комплектів ріжучого інструменту КРІ та УЗП для кожного варіанту технологічного маршруту обробки.

3. Визначення норми часу обробки кожному за варіанта технологічного маршруту.

4. Визначення необхідної кількості одиниць ріжучого інструменту кожного найменування всім допустимих варіантів технологічного маршруту обробки.

Схема другого етапу моделювання представлена рис. 3.

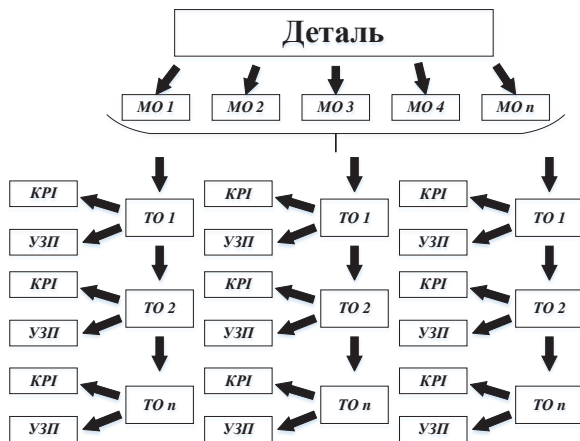


Рис. 3. Схема другого етапу виробництва

На третьому етапі моделювання проводиться вибір оптимального варіанта маршруту технологічної обробки та засобів технологічного оснащення. На цьому етапі вирішуються такі завдання:

1. Визначення величини змінних витрат за виготовлення партії деталей кожному за варіанта технологічного маршруту.

2. Визначення мінімальних термінів виготовлення партії деталей для кожного технологічного маршруту, що проводиться на основі аналізу завантаження технологічного обладнання, наявності необхідних засобів виробництва та строків їх постачання.

3. Визначення термінів та розмірів партій постачання засобів виробництва (ріжучий інстру-

мент, заготовки та ін.) з урахуванням наявних матеріалів та ємності складу.

4. Визначення оптимального варіанта технологічного маршруту обробки з урахуванням аналізу групи показників.

Оптимальний варіант технологічного маршруту обробки визначається з урахуванням аналізу наступних показників: величини змінних витрат за виготовлення партії деталей; мінімальних термінів виготовлення партії деталей; тривалості виготовлення партії деталей. Вибір оптимального варіанта технологічного маршруту обробки проводиться на основі методу ідеальної точки. Для визначення відстані до «ідеальної точки» застосовується формула виваженої евклідової відстані [9]:

$$d_{\sigma E}(x_i, x_j) = \sqrt{\sum_{k=1}^p w_k (x_i^{(k)} - x_j^{(k)})^2} \quad (1)$$

де $d_{\sigma E}$ – зважена евклідова відстань; $x_i^{(k)}$ – значення k-ої властивості об'єкта i; $x_j^{(k)}$ – значення k-ої властивості об'єкта j; w_k – «вага» k-го критерію; p – кількість критеріїв.

Оптимальним варіантом технологічного маршруту обробки буде вважатися варіант з мінімальним значенням виваженої евклідової відстані.

Математична модель. При розробці моделі технологічної підготовки дрібносерійного та одиничного типів виробництва були використані такі математичні моделі:

1) визначення величини змінних витрат за виготовлення продукції;

2) визначення норми оперативного часу ($T_{оп}$);

3) комбінована модель управління запасами.

Визначення величини змінних витрат за виготовлення продукції. Оцінка величини змінних витрат за виготовлення продукції проводиться з урахуванням розрахунку таких економічних елементів: матеріальних витрат; витрат на оплату праці; відрахувань на державне соціальне страхування.

Сума матеріальних витрат підприємства визначається за формулою [10]:

$$M = \sum_{j=1}^m \Pi_{mj} M_j \quad (2)$$

де I_{mj} – покупна ціна натуральної одиниці j -го матеріального ресурсу, грн/од; M_j – кількість натуральних одиниць j -го матеріального ресурсу; m – число найменувань матеріальних ресурсів.

Витрати оплати праці (3) визначаються за такою формулою [10]:

$$З = \alpha Ч \left(1 + \frac{P_{ДЗ}}{100} \right) \quad (3)$$

де α – середня основна заробітна плата одного працівника підприємства за розрахунковий період часу, грн./чол; $Ч$ – середня чисельність персоналу цей період, чол; $P_{ДЗ}$ – середня величина додаткової заробітної плати у відсотках до основної, %.

Величина відрахувань на обов'язкове державне соціальне страхування (O , грн.) розраховується за формулою [10]:

$$O = 3 \frac{p}{100} \quad (4)$$

де p – сумарний відсоток відрахування, що розраховується на основі законодавства, %, у фонди від суми витрат на оплату праці.

Визначення норми часу виготовлення партії деталей. Норма оперативного часу ($T_{оп}$) дорівнює сумі основного (машинного) часу та допоміжного неперекриваемого часу і визначається за формулою [11]:

$$T_{он} = T_o + T_{вн} \quad (5)$$

де T_o – основний (машинний) час, хв; $T_{вн}$ – допоміжний час, що не перекривається основним, хв.

Основний (машинний) час залежить від режимів роботи обладнання та визначається за формулою [11]:

$$T_o = T_{ax} + T_m \quad (6)$$

де T_{ax} – час автоматичного холостого ходу, пов'язаного з підведенням, відведенням інструменту або деталі, поворотами деталі, хв; T_m – власне машинний час, хв.

Машинний час розраховується на основі заданих режимів різання (глибина різання, подача та швидкість різання).

Детермінована модель управління запасами (комбінована модель). Для управління запасами необхідно визначити такі параметри: точку замовлення; величину резервного запасу; величину поточної партії.

Точка замовлення – це рівень запасу, при якому має бути зроблено замовлення чергової партії. Її значення визначається за такою формулою [12]:

$$H_{мз} = T_{пост} + I_{max} \quad (7)$$

де $T_{пост}$ – час виконання замовлення; I_{max} – максимальна інтенсивність споживання ресурсу.

Величина резервного запасу складі визначається за формулою [12]:

$$H_{рез} = H_{мз} - T_{пост} I_{cp} = T_{пост} - \frac{I_{max} - I_{min}}{2} \quad (8)$$

де $H_{рез}$ – величина резервного запасу на складі; I_{cp} – середня інтенсивність споживання ресурсу; I_{min} – мінімальна інтенсивність споживання ресурсу;

$$I_{cp} = \frac{I_{max} - I_{min}}{2} \quad (9)$$

Величина поточної партії поставки визначається за формулою [18]:

$$(n_{тек})_{max} = H_{скл} - T_{пост} (I_{max} - I_{тек}) \quad (10)$$

де $n_{тек}$ – величина партії постачання; $H_{скл}$ – обсяг складу;

$$(n_{тек})_{max} \geq H_{мз}; \quad (11)$$

$$T_{пост} \leq \frac{H_{скл} - (n_{тек})_{min}}{I_{max} - I_{min}} \quad (12)$$

де $(n_{тек})_{max}$ – максимальний розмір партії поставки.

Висновки. Описана у статті модель технологічної підготовки дрібносерійного та одиничного виробництва дозволяє обрати кращий варіант технологічного маршруту обробки партії деталей на основі багатокритеріального аналізу та сформулювати перелік засобів виробництва, необхідних для процесу обробки, визначити оптимальні технологічні параметри процесу різання, величину змінних витрат та терміни виготовлення партії деталей.

Застосування розробленої моделі дозволить скоротити тривалість ТПВ за рахунок її автоматизації, що слугуватиме значною конкурентною перевагою в умовах дрібносерійного та одиничного виробництва.

Застосування розробленої моделі дозволяє забезпечити відсутність простоїв технологічного обладнання через відсутність на складах засобів виробництва, що необхідні для процесу обробки.

Список літератури:

1. Kalas S. Small-Scale Automation in Shipbuilding. Norwegian : Norwegian University of Science and Technology, 2015. 92 p.
2. Філіппова М. В. Система керування виробничими процесами. Міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених і спеціалістів “Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації” ESMO. 2019. С. 105–107.

3. 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.
4. Mujber T., Szecsi T., Hashmi M. Virtual reality applications in manufacturing process simulation. Journal of Materials Processing Technology. 2004. No. 155. P. 1834–1838.
5. Seleim A., Azab A., AlGeddawy T. Simulation methods for changeable manufacturing. 45th CIRP Conference on Manufacturing Systems. 2012. P. 179–184.
6. Pokorny P., Kuznetsov A. Automation of the Selection of the Integrated, Strategies. International Conference on Manufacturing Engineering and Materials. 2016. P. 380–383.
7. Бондаренко С. Основи технології машинобудування: навч. посіб. Львів : Магнолія, 2009. 567 с.
8. Автоматизація технічної підготовки виробництва: навч. посіб. / П. Павленко та ін. Вінниця : ВНТУ, 2006. 114 с.
9. Костюк В. О. Прикладна статистика: навч. посіб. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекет., 2015. 191 с.
10. Бойчик І. Економіка підприємства: навч. посіб. Тернопіль : Кондор -Вид-во, 2016. 378 с.
11. Калина А. В. Організація та нормування праці на виробництві : навч. посіб. Дніпро : МАУП, 2014. 474 с.
12. Виробничий менеджмент: навч. посіб. / Бутко М. та ін. Київ : ЦУЛ, 2015. 424 с.

Proskurenko D.M., Tretiak O.V., Filippova M.V. AUTOMATION OF TECHNOLOGICAL PREPARATION OF UNIT AND SMALL SERIES PRODUCTION

The article describes a simulated prototype of technological preparation of small-scale and single types of production. Currently, a significant number of products are produced in single and small-scale production, where the complexity of the stage of technological preparation of production is most noticeable. This leads to lower productivity and increased production. Due to the introduction of automation and modeling of the production process it is possible to reduce the complex of technological preparation of production. The purpose of this work is to design the site of the enterprise for machining. The designed machining area is designed for the manufacture of parts needed for repair and production of the cooperative in terms of single and small-scale production. Based on the described model, the optimal variant of the technological route of batch processing, timing of parts, the value of variable costs, optimal technological parameters of the processing and inventory management, as well as the formation of the range and the required number of means of production. The prototype was developed based on mathematical models of inventory management (combined model) and the formation of variable costs and operating time. Determining the best option is based on multi-criteria analysis using the method of "ideal point" on three parameters: the value of variable costs for the production of a batch of parts, the minimum time to produce a batch of parts, the time required to produce a batch of parts. When writing this article, it was determined that the use of the developed prototype will reduce the duration of technological preparation of production by automating production, which will serve as a significant competitive advantage in single and small production; the application of the developed model will ensure the absence of downtime of technological equipment, which may be due to the lack of storage facilities, production facilities required for the processing process.

Key words: automation of production, production of details, technological preparation of production.

Хлопенко М.Я.

Херсонська державна морська академія

Хлопенко І.М.

Херсонська державна морська академія

МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНОМУ АСИНХРОННОМУ ЕЛЕКТРОПРИВОДІ СУДНОВОГО V-ПОДІБНОГО ДВОСТУПІНЧАСТОГО ПОРШНЕВОГО КОМПРЕСОРА

Метою роботи є моделювання перехідних процесів у частотно-регульованому асинхронному електроприводі суднового V-подібного двоступінчастого поршневого повітряного компресора з прямим кутом розвалу. Для проведення досліджень використовувалася структурна схема замкнутої системи частотного керування електроприводу з ПІ-регулятором. Визначено маси кривошипно-шатунного механізму (КШМ) та маховика з приведеними до поршнів та осі шатунної шийки зосередженими масами шатунів. За ними розраховані приведені до кривошипу моменти інерції мас КШМ, що обертаються і поступово рухаються. Побудовано класичну модель навантажень на машину по куту повороту кривошипу від сил тяжіння поступово рухомих мас. Визначено статичне навантаження на електродвигун. Виконаний у пакеті MathCAD за індикаторними діаграмами розрахунок тисків повітря в циліндрах по куту повороту кривошипу, що діють на поршині компресора. Проведено розкладання цих тисків за гармоніками до рядів Фур'є до п'ятнадцятого порядку включно. Розраховано в тому ж пакеті MathCAD навантаження на електродвигун від дії гармонійних газових сил залежно від кута повороту кривошипу. Побудовано в пакеті Simulink математичну модель електроприводу компресора із знайденими навантаженнями та моментами інерції КШМ. За цією моделлю визначено кутову швидкість валу електроприводу. Для її знаходження залучалася теорема про зміну кінетичного моменту системи щодо нерухомої осі з курсу теоретичної механіки. Необхідний для розрахунку моментів інерції та навантажень кут повороту кривошипу визначався шляхом інтегрування за часом кутової швидкості. Він також використовувався в побудованій моделі при затримці часу процесу, необхідного для продувки компресора при запуску електродвигуна та при розрахунку тиску стиснення повітря в компресорі та його нагнітання в сміст для зберігання. Побудовані перехідні процеси крутного моменту, навантаження на кривошип і кутової швидкості машини. Їх розкид перебуває у межах допусків. Удосконалено математичну модель і методику перехідних процесів в частотно-регульованому асинхронному електроприводі суднового V-подібного двоступінчастого поршневого повітряного компресора з прямим кутом розвалу та з урахуванням дії сил тертя, періодичних газових сил та сил тяжіння поступово рухомих мас КШМ. Створена схема моделювання перехідних процесів в частотно-регульованому асинхронному електроприводі компресора дозволяє проводити розрахунки параметрів системи стисненого повітря на перехідних та усталених режимах. Бібл. 14, рис. 7.

Ключові слова: моделювання перехідних процесів, електропривод асинхронний, двоступеневий компресор, частотне регулювання.

Постановка проблеми. У даний час на багатьох суднах для пуску та реверсування головних двигунів та роботи інших технічних пристроїв використовуються двоступінчасті V-подібні поршневі компресори стисненого повітря з прямим кутом розвалу. Кожен компресор приводиться в дію асинхронним електродвигуном з короткозамкненим ротором, що не регулюється. Ротор електродвигуна жорстко пов'язаний з колінчастим валом КШМ компресора з маховиком. Цей вал при роботі компресора постійно схильний до дії моментів сил

тертя, газових сил та сил тяжіння, що періодично повторюються з частотою обертання. Особливо небезпечними є газові сили. На перехідних режимах вони можуть призводити до перевантаження машини та неприпустимих параметричних коливань кутової швидкості жорсткого валу. Інтенсивність цих коливань та коливань електромагнітного моменту двигуна при заданому моменті інерції маховика значною мірою залежить від керування роботою машини. Відчутний ефект можна досягти при частотному керуванні.

Заміна нерегульованого електроприводу компресора на регульований дозволяє суттєво знизити споживання електроенергії, збільшити термін служби механічної частини електроприводу та підвищити якість регулювання кутової швидкості асинхронної машини. Деякі виробники компресорних агрегатів вже переходять на такий спосіб керування. Тому моделювання перехідних процесів у частотно-регульованому асинхронному електроприводі суднового V-подібного двоступінчастого поршневого повітряного компресора з прямим кутом розвалу є доцільним.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомо три підходи для дослідження двоступінчастих компресорів – метод математичного моделювання, математичного експерименту та фізичного моделювання. Перший передбачає створення математичних моделей і методик для дослідження компресорів, другий – віртуальні випробування й третій – експеримент на фізичних моделях.

Створення математичних моделей і методик різного рівня складності, а також моделювання за ними перехідних процесів в електроприводах кутових і V-подібних поршневих компресорів з поршнями, що протилежно рухаються, розглянуто в роботах [1, 2], причому інтерес до дослідження різного типу компресорів даним методом не слабшає. Основними недоліками цих робіт є наближений розрахунок сил інерції за спрощеними і давно сформованими методиками [2], нехтування змінністю моменту інерції в рівняннях руху колінчастого валу КШМ [1, 2], відсутність системи керування процесом регулювання швидкості електроприводів [1, 2].

Розрахунок термодинамічних циклів у циліндрах багатоступінчастих компресорів висвітлено у капітальних працях [3, 4]. Удосконалення цих циклів продовжується й у теперішній час.

Багато робіт присвячено моделюванню навантажень на поршень одноциліндрового холодильного компресора. Серед них слід зазначити роботи [5-7]. У них викладено методику моделювання моменту опору [5], обґрунтовано вибір скалярного принципу керування трифазним асинхронним електродвигуном та введено в структурну схему корекцію для бездатчикового визначення частоти обертання та моменту опору [6], змодельований пуск електроприводу [7].

Розрахунок навантажувальних характеристик електроприводу кутового компресора викладено у статті [8]. У ній запропоновано алгоритм розрахунку параметрів та характеристик даного компресора на основі аналізу кінематичної схеми.

Наведено побудову навантажувальних діаграм кутового компресора в функції кута повороту валу. За сумарним моментом сил навантажувальних діаграм розроблено методику вибору потужності приводу компресора. Однак представлений у роботі алгоритм і методика вибору потужності двигуна на основі аналізу кінематичної схеми механізму не враховують розкид навантажувальних характеристик електроприводу компресора при їх періодичних коливаннях біля стану, що установився.

Питанням математичного експерименту присвячені роботи [9, 10]. Це новий напрям у науці, досить широко розповсюджений на практиці, цілком не виключає фізичного експерименту. В даній роботі він не розглядається.

Таким чином, виконаний аналіз публікацій по даній тематиці дозволяє встановити, що проблема моделювання перехідних процесів у частотно-регульованому асинхронному електроприводі суднового V-подібного двоступінчастого повітряного компресора з прямим кутом розвалу з урахуванням періодичних коливань навантаження на електродвигун не розглядалася.

Постановка завдання. Метою роботи є моделювання перехідних процесів у частотно-регульованому асинхронному електроприводі суднового V-подібного двоступінчастого поршневого повітряного компресора з прямим кутом розвалу. Для досягнення цієї мети необхідно на основі існуючих теоретичних досліджень удосконалити математичну модель та методику моделювання частотного керування електропривода даного компресора, розробити пакет обчислювальних програм, структурну схему системи керування та схему моделювання перехідних процесів в пакеті Simulink, а також виконати їх розрахунки та провести аналіз отриманих результатів.

Виклад основного матеріалу дослідження. На рис. 1 представлена структурна схема лінеаризованого в межах робочої ділянки механічної характеристики об'єкта керування, замкнута по кутовій швидкості асинхронного двигуна неединичним зворотним зв'язком з коефіцієнтом підсилення $K_{\omega} = U/\omega$ (U – напруга задатчика; ω – кутова швидкість ротора машини). Вона побудована із залученням робіт [11-13].

Схема містить аперіодичну корегуючу ланку з постійною часу T_{pr} , що полегшує пуск машини, передавальні функції ПІ-регулятора швидкості, перетворювача частоти (ПЧ) і асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором і приведеним до осі ротора моментом інерції $J(\varphi)$ виконавчого механізму (компресора), що залежить від кута повороту

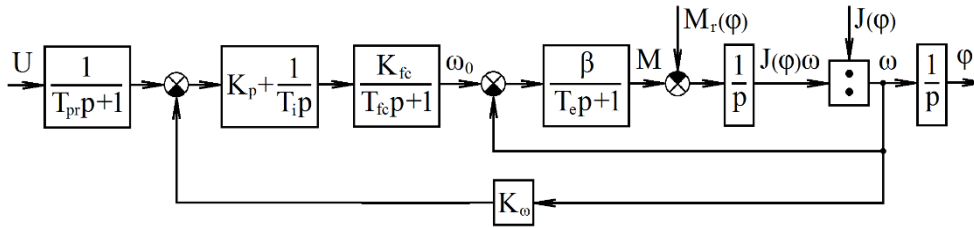


Рис. 1. Структурна схема частотного керування асинхронного електроприводу

кривошипу φ . Пропорційна складова передавальній функції ПІ-регулятора позначена K_p , а постійна часу її інтегральної складової T_i . Передавальна функція ПЧ описується аперіодичною ланкою з передавальним коефіцієнтом K_{fc} та постійною часу T_{fc} [11]. Асинхронний двигун має дві ланки, охоплені одним зворотним зв'язком. Перша ланка описує електромагнітну частину машини, а друга – її механічну частину. Електромагнітна частина машини представлена аперіодичною ланкою, а механічна частина – інтегруючою ланкою та дільником. Аперіодична ланка містить у чисельнику модуль жорсткості лінеаризованої механічної характеристики β , а в знаменнику – електромагнітну постійну часу T_e кіл статора та ротора асинхронного електродвигуна. Структурна схема також містить ланку затримки сигналу часу, необхідного для продувки компресора, та пропорційну ланку тиску повітря в ємності для його зберігання. Ці елементи на рис. 1 не показані.

Жорсткість механічної характеристики машини визначається, як відомо з роботи [11], за формулою

$$\beta = \frac{2M_{cr}}{\omega_{0n} s_{cr}}, \quad (1)$$

де M_{cr} – критичний момент; $\omega_{0n} = 2\pi f / z_p$ – номінальна кутова швидкість електромагнітного поля (холостого ходу машини); s_{cr} – критичне ковзання; f – частота живлення; z_p – число пар полюсів.

Електромагнітна постійна часу

$$T_e = \frac{1}{\omega_{0el.n} s_k}, \quad (2)$$

де $\omega_{0el.n} = 2\pi f = 314$ рад/с.

Електромагнітний момент двигуна M і момент навантаження $M_r(\varphi)$, що діє на його ротор, не є постійними величинами. Однак на квазіусталеному режимі, коли швидкість електроприводу змінюється в невеликих межах внаслідок зміни навантаження на роторі машини, їх середні значення можна вважати постійними і приблизно рівними, а похідну за часом від кутової швидкості рівною нулю, тобто $d\omega/dt = 0$.

Іншою умовою стійкості квазіусталеного режиму є, як відомо з [12], нерівність $\beta < \beta_r$, де β , β_r – жорсткості механічної характеристики двигуна і робочого компресора в точці режиму, що установився. Оскільки $\beta < 0$, а $\beta_r = 0$ в точці на механічній характеристиці встановленого режиму, ця нерівність завжди виконується.

Перейдемо від структурної схеми об'єкта до математичного опису її характеристик та навантажень, що діють на машину.

Приведений до осі ротора електродвигуна момент інерції компресора $J(\varphi)$ можна представити у вигляді:

$$J(\varphi) = J_0 + m_1 r^2 f_1(\varphi) + m_2 r^2 f_1\left(\varphi + \frac{3\pi}{2}\right), \quad (3)$$

де

$$f_1(\varphi) = \left[\sin \varphi + 0,5\lambda \frac{\sin 2\varphi}{\sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \varphi}} \right]^2; \quad (4)$$

J_0 – приведений до нерухомої осі обертання кривошипа постійний момент інерції, що дорівнює сумі моментів інерції ротора електродвигуна, колінчастого валу, приведеної до осі шатунної шийки $2/3$ маси обох шатунів та маховика; m_1 , m_2 – відповідно сумарна маса поршня, поршневих кілець, пальця верхньої головки шатуна та $1/3$ маси шатуна, приведеної до поршня першої та другої ступені компресора; $\lambda = r/l$ – відношення радіуса r кривошипу OA (рис. 2) до довжини $l = AB = AC$ шатуна. Кут φ повороту кривошипа OA відраховується від прямої лінії OB у напрямку обертання кривошипа з кутовою швидкістю ω при положенні поршня в циліндрі першої ступені у верхній мертвій точці (ВМТ).

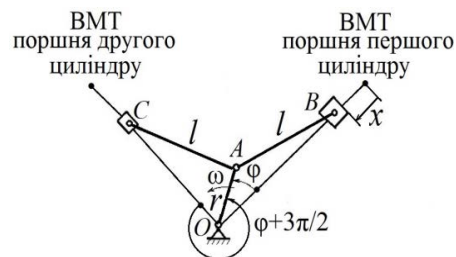


Рис. 2. Кінематична схема компресора

Для компресорів зі значеннями $\lambda \leq 0,15$ другий доданок у квадратних дужках виразу (4) розкладемо в біноміальний ряд з утриманням двох членів ряду:

$$\frac{1}{\sqrt{1-\lambda^2 \sin^2 \varphi}} \cong 1 + \frac{1}{2} \lambda^2 \sin^2 \varphi. \quad (5)$$

Другий член ряду (5) набагато менше одиниці. Його максимальна помилка не перевищує 2,25 % у порівнянні з одиницею. Тому, нехтуючи цим членом ряду і дуже малою величиною $0,25\lambda^2 \sin^2 2\varphi$ при піднесенні правої частини виразу (4) у квадрат, отримаємо для (3) наступний вираз:

$$f_1(\varphi) = \sin^2 \varphi + \lambda \sin \varphi \cdot \sin 2\varphi. \quad (6)$$

При розрахунку осьового моменту інерції колінчастого валу, що складається з двох щік у вигляді прямокутного паралелепіпеда, однієї шатунної шийки з двома насадженими нижніми головками шатунів і двох корінних шийок, використовувалися відомі з підручників [13, 14] вирази і теорема Гюйгенса-Штейнера для моментів інерції тіла відносно паралельних осей.

Еквівалентний момент статичного опору M_{rs} при періодично повторюваному діючому навантаженні на кривошип, включаючи момент тертя, приймається рівним номінальному електромагнітному моменту двигуна [12]. Його значення визначається виразом (7):

$$M_{rs} = \frac{P_n}{\omega_n}, \quad (7)$$

де P , ω – відповідно потужність і кутова швидкість електродвигуна. Індекс n позначає номінальні значення величин.

Приведений до кривошипу момент сил тяжіння мас поршнів з кільцями та пальцями й 1/3 маси шатунів, що поступально рухаються, розраховується з урахуванням малості другого доданку в (5) за формулою (8):

$$M_{gr}(\varphi) = gr \cos \frac{\pi}{4} \left[m_1 f_2(\varphi) + m_2 f_2 \left(\varphi + \frac{3\pi}{2} \right) \right], \quad (8)$$

де $f_2(\varphi) = \sin \varphi + \frac{\lambda}{2} \sin 2\varphi$; g – прискорення вільного падіння.

Приведений до кривошипу момент сил тиску повітря на поршні, що здійснюють зворотно-поступальний рух у циліндрах, знаходиться окремо для кожної ступені компресора. Тиски на поршні визначаються у процесі розрахунку індикаторних діаграм. Розрахунок індикаторних діаграм проводиться за кінематичною схемою одного КШМ. При цьому положення кожного поршня при зворотно-поступальному русі визначається координатою $x(\varphi)$. Кожна з цих координат відра-

ховується від ВМТ, що відповідає куту повороту кожного кривошипа $\varphi=0$, і може бути визначена за формулою:

$$x(\varphi) = r \left[1 - \cos \varphi + \frac{\lambda}{2} (1 - \cos^2 \varphi) \right]. \quad (9)$$

Ця формула дозволяє знайти кут повороту кривошипа φ для кожної ступені компресора в залежності від координати $x(\varphi)$. Цей кут φ необхідний для визначення границь тисків термодинамічних процесів по індикаторним діаграмам ідеального компресора. Ці діаграми представлені на рис. 3 в px координатах, де $x=x(\varphi)$.

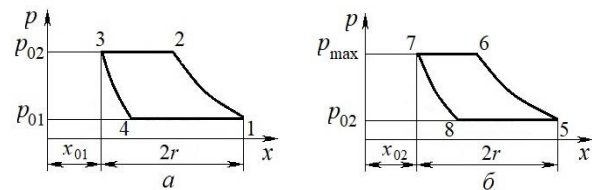


Рис. 3. Індикаторні діаграми першої (а) та другої (б) ступенів компресора

Кожна з них складається з ідеальних термодинамічних процесів всмоктування 4-1, 8-5, стиснення 1-2, 5-6, нагнітання 2-3, 6-7 та зворотного розширення 3-4, 7-8. Процеси всмоктування 4-1, 8-5 та нагнітання 2-3, 6-7 є ізобарними. Процеси стиснення 1-2, 5-6 та зворотного розширення 3-4, 7-8 приймаються адіабатними з показником $k=1,4$, як і у роботі [4].

Тиски повітря на поршні циліндрів для кожного термодинамічного процесу індикаторних діаграм визначаються за формулами, отриманими з рівнянь стану для ідеального газу. Ці формули для тиску повітря в циліндрах кожної ступені компресора мають вигляд:

$$p = \varepsilon_s p_{0s} \left[\frac{x_{0s}}{x(\varphi) + x_{0s}} \right]^k, \text{ якщо } 0 \leq \varphi \leq \varphi_4;$$

$$p = p_{0s}, \text{ якщо } \varphi_4 < \varphi \leq \pi;$$

$$p = \varepsilon_s p_{0s} \left[\frac{x_{0s}}{x(\varphi) + x_{0s}} \right]^k, \text{ якщо } \pi < \varphi \leq \varphi_2;$$

$$p = \varepsilon_s p_{0s}, \text{ якщо } \varphi_2 < \varphi \leq 2\pi \text{ (s=1, 2)}, \quad (10)$$

де ε_s – ступінь стиснення повітря в s -м циліндрі, причому $\varepsilon_1 = V_{h1}(1+a_1)/V_{h2}(1+a_2)$ при охолодженні повітря після першої ступені до рівних значень температур на вході до циліндрів, а ступінь стиснення у другому циліндрі $\varepsilon_2 = p_{max}/\varepsilon_1$ (p_{max} – максимальний тиск); $V_{hs} = 0,5\pi d_s^2 r$ – робочий об'єм s -ого циліндра; d_s – діаметр поршня; a_s – відносний мертвий об'єм s -ого циліндра; $x_{0s} = 2ra_s$ – координата кутової точки 3 ($s=1$) або 7 ($s=2$) у ВМТ;

φ_2, φ_4 – кути повороту кривошипу у кутових точках 2 або 6 та 4 або 8 побудованих на рис. 3 індикаторних діаграм.

Записані формули (10) утворюють розімкнені термодинамічні цикли в системі координат p, φ . Ці цикли визначені на відрізку $(0; 2\pi)$ і періодично повторюються по куту повороту кривошипу з періодом 2π . Тому, шматково-гладкі функції тиску, що описують їх, допускають розкладання в ряди Фур'є. Значення коефіцієнтів кожного члена ряду із заданою точністю розраховуються програмно у пакеті MathCAD. Там же розраховуються наведені до кривошипу моменти тисків, рівних значенням часткових сум гармонік $S_s(\varphi, m)$ ряду Фур'є до m -го порядку включно, за формулою:

$$M_{gs} = r \frac{\pi d_s^2}{4} \left[\sin \varphi + 0,5\lambda \frac{\sin 2\varphi}{\sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \varphi}} \right] S_s(\varphi, m), \quad (11)$$

де

$$S_s(\varphi, m) = \frac{a_{0s}}{2} + \sum_{n=1}^{n=m} A_{ns} \sin(n\varphi + \psi_{ns}); \quad (12)$$

a_{0s} – постійний коефіцієнт; A_{ns} – амплітуда гармоніки; ψ_{ns} – початкова фаза; n – порядок гармоніки. Індекс $s=1$ відноситься до першої ступені, а $s=2$ – до другої ступені компресора, як і в формулі (10). Складаючи алгебраїчні моменти (11) і враховуючи різницю $3\pi/2$ рад кутів повороту кривошипа другої та першої ступенів компресора при відліках цих кутів від прямих ліній OC та OB , зображених на рис. 2, знаходимо приведені до кривошипу сумарний момент діючих газових сил на поршні циліндрів компресора:

$$M_g(\varphi) = M_{g1}(\varphi) + M_{g2}\left(\varphi + \frac{3\pi}{2}\right). \quad (13)$$

Наведені формули (7), (8) та (13) з урахуванням (9)-(12) дозволяють розрахувати навантаження $M_r(\varphi)$ (див. рис. 1) на асинхронний двигун.

Максимальний допустимий тиск у ємності для зберігання повітря визначається співвідношенням (14):

$$p_{\max} = p_{\min} + p_{02} \frac{V_{h2}(1 - a_2)}{V} \varepsilon_2^{\frac{k-1}{k}} \frac{\varphi}{2\pi}, \quad (14)$$

де p_{\min}, p_{\max} – тиск повітря в ємності в початку та кінці процесу її заповнення; V – об'єм ємності.

Настройка тиску повітря в компресорах та ємності для його зберігання проводиться самодіючими всмоктуючими, нагнітальними та незворотними клапанами. Клапани приймаються ідеальними, що значно полегшує розрахунки [4].

Час у секундах від початку продувки компресора до стиснення повітря в ємності від мінімального p_{\min} до максимального p_{\max} тисків може бути обчислено за наближеною формулою (15):

$$t_{\max} = T_{pr} + t_p + \frac{2\pi}{\omega_n} \cdot \frac{p_{\max} - p_{\min}}{p_{02} \varepsilon_2^{\frac{k-1}{k}}} \cdot \frac{V}{V_{h2}(1 - a_2)}, \quad (15)$$

де t_p – час, витрачений на продувку компресора.

Моделювання перехідних процесів у частотно-регульованому асинхронному електроприводі суднового V-подібного поршневого двоступінчастого повітряного компресора з прямим кутом розвалу проводилося на конкретному прикладі в пакеті Simulink із залученням формул (1)-(15). В якості асинхронного двигуна використовувався електродвигун Ноуер НМС2-160L-4 з такими даними: потужність 15 кВт, номінальна частота обертання 1460 об/хв, напруга 400 В, номінальний момент 98 Н·м, пусковий момент 216 Н·м; критичний момент 226 Н·м; номінальний струм статора 28 А; критичне ковзання 0,12773; частота живлення 50 Гц.

Вихідними даними для моделювання служили наступні величини: $M_{rs} = 98$ Н·м; $U = 10$ В; $T_{pr} = 2$ с; $K_p = 0,1027$; $T_i = 0,4199$ с; $K_{fc} = 15,708$ рад/(В·с); $T_{fc} = 0,001$ с; $K_{\omega} = 0,0654$ В·с/рад; $\beta = 22,5$ Н·м/(рад·с); $T_e = 0,0249$ с; $\lambda = 0,131$; $r = 21$ мм; $m_1 = 0,996$ кг; $m_2 = 0,342$ кг; $J_0 = 1,5$ кг·м²; $p_{01} = 0,1$ МПа; $d_1 = 100$ мм; $d_2 = 46$ мм; $a_1 = a_2 = 0,1$; $p_{\min} = 2,5$ МПа та $p_{\max} = 2,8$ МПа, а також розрахункові значення степенів стиснення повітря в циліндрах компресора $\varepsilon_1=4,726$; $\varepsilon_2=5,925$ і кутів повороту кривошипа φ_4, φ_2 в кутових точках 4 і 2 індикаторної діаграми 1-2-3-4 циліндра першої ступені та φ_8, φ_6 в кутових точках 8 і 6 індикаторної діаграми 5-6-7-8 циліндра другої ступені компресора. Ці кути для першої ступені виявилися рівними $\varphi_4 = 2,256069$ рад і $\varphi_2 = 5,733744$ рад при прийнятих значеннях $\varphi_3 = 0$ і $\varphi_1 = \pi$ рад у точках 3 і 1. Для індикаторної діаграми 5-6-7-8 другої ступені обчислені значення кутів повороту кривошипа при відліку від положення поршня в ВМТ цього циліндра в кутових точках 8 і 6 вийшли рівними $\varphi_8 = 2,221462$ рад і $\varphi_6 = 5,636105$ рад при значеннях кутів $\varphi_7 = 0$ і $\varphi_5 = \pi$ рад в кутових точках 7 та 5. Час продувки компресора t_p при пуску прийнято 10 с.

На рис. 4 наведені графічні залежності тисків $S_s(\varphi, 15)$ і $p(\varphi)$ у циліндрах першого (а) та другого (б) ступенів компресора, розрахованих за формулами (12) часткового ряду Фур'є (суцільна лінія) та виразами (10) (точкова лінія). Отримано добрий збіг цих залежностей, крім кількох точок, при заданому числі $m=15$ членів ряду Фур'є.

На рис. 5 представлені графіки приведених до кривошипу моментів сил тиску газу на поршні

циліндрів першої (а) і другої (б) ступенів компресора, обчислених за формулами (11) і при заміні в (11) часткової суми ряду Фур'є (12) на вирази (10). На цих графіках моменти, отримані в процесі зазначеної заміни, позначені відповідно виразами $M_{1g}(\varphi)$ і $M_{2g}(\varphi)$. Як і слід було очікувати, отримано добрий збіг результатів розрахунку за обома формулами.

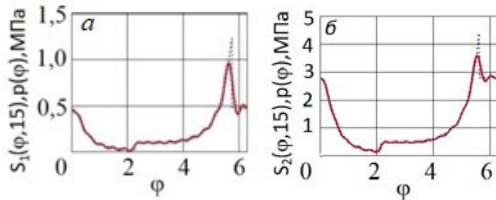


Рис. 4. Залежності тисків від кута повороту кривошипу для циліндрів першої (а) і другої (б) ступенів: $S_1(\varphi, 15)$ – суцільна лінія; $p(\varphi)$ – точкова лінія

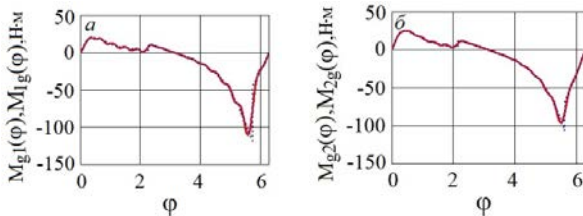


Рис. 5. Приведені до кривошипу моменти сил тиску газу на поршні циліндрів першої (а) і другої (б) ступенів компресора: $M_{g1}(\varphi)$, $M_{g2}(\varphi)$ – суцільна лінія; $M_{1g}(\varphi)$, $M_{2g}(\varphi)$ – точкова лінія

На рис. 6 показані результати розрахунків відношення приведенного до кривошипу моменту $M_r(\varphi)$ (див. рис. 1), рівного сумі постійного моменту еквівалентного статичного опору (7) і вимушених коливань моментів сил тяжіння (8) і газових сил (11) відносно усталеного динамічного стану, до номінального моменту електродвигуна M_n . Обчислене за цім рисунком середнє квазіустале значення цього відношення склало 0,83.

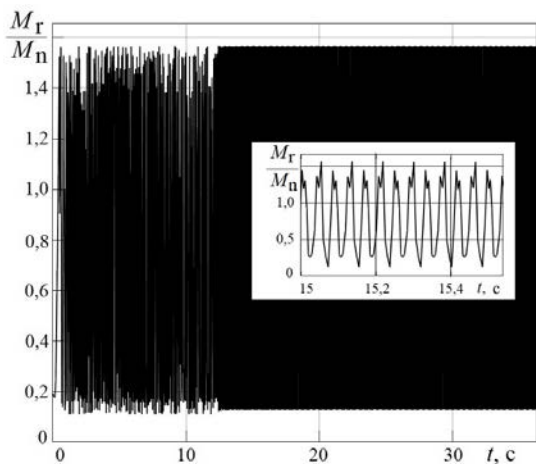


Рис. 6. Залежність безрозмірного моменту M_r/M_n від часу t при пуску компресора

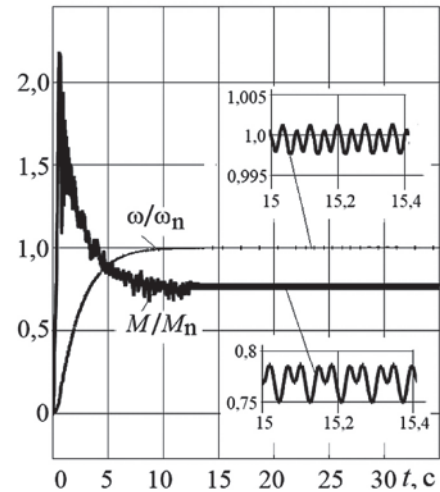


Рис. 7. Перехідні процеси в асинхронному електроприводі при частотному керуванні

На рис. 7 наведені перехідні процеси безрозмірної кутової швидкості ω/ω_n та безрозмірного електромагнітного моменту двигуна M/M_n частотно-регульованого електроприводу.

Знайдене за рис. 7 середнє квазіустале значення безрозмірного електромагнітного моменту становить 0,77 при постійному розмаху коливань, що не перевищує 3,6 % від номінального значення, і відрізняється від середнього безрозмірного значення квазіусталеного моменту опору приблизно на 6 %. При цьому наростання та стабілізація безрозмірної кутової швидкості ротора електродвигуна, жорстко пов'язаного з колінчастим валом компресора, протікає при дуже малих значеннях її розмахів, що не перевищують 0,4 % від номінального значення на усталеному режимі.

Висновки. Удосконалено математичну модель та запропоновано методику моделювання частотного керування суднового V-подібного двоступінчастого поршневого повітряного компресора з прямим кутом розвалу та з урахуванням змінних моментів інерції обертових та поступово рухомих мас з приєднаними масами шатунів до поршнів та шатунної шийки колінчастого валу, дії на кривошип сил статичного опору, періодичних газових сил і сил тяжіння поступово рухомих мас КШМ. Створено пакет обчислювальних програм для розрахунку зазначених моментів інерції та діючих сил. Отримана структурна схема та схема моделювання частотного керування асинхронного електроприводу компресора дозволяє проводити розрахунки параметрів системи стисненого повітря на перехідних та усталених режимах. Результати аналізу проведених розрахунків показали, що при частотному керуванні електропривода забезпечується стабілізація коливань кутової швидкості жорсткої системи, що складається з ротора асинхронного електродвигуна та колінчастого валу КШМ, у межах допусків при заданому моменті інерції маховика.

Список літератури:

1. Morillo A.H.V., Kurka P.R.G., Bittencourt M. L. Dynamics analysis of reciprocating compressor crankshafts. *Proceedings of the 10th International Conference on Rotor Dynamics*. (21 August 2018) / eds K.L. Cavalca, H.I. Weber: Springer Nature Switzerland, 2019. Vol. 1. P.489–501. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-319-99268-6_34.
2. Chernyi S.G., Erofeev P., Novak B., Emelianov V. Investigation of the mechanical and electromechanical starting characteristics of an asynchronous electric drive of two-piston marine compressor. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021. № 9, 207. P.1–11. URL: <https://doi.org/10.3390/jmse9020207>.
3. Френкель М.И. Поршневые компрессоры. Теория, конструкции и основы проектирования. Л. : Машиностроение, 1969. 744 с.
4. Пластинин П.И. Поршневые компрессоры. Теория и расчет. Изд. 3-е, доп. М. : КолосС, 2006. Т. 1. 456 с.
5. Букарос А.Ю., Букарос В.Н., Онищенко О.А. Моделирование момента сопротивления однопоршневого компрессора судовой холодильной установки. *Технологический аудит и резервы производства*. 2015. № 4/1(24). С. 46–51. DOI: 10.15587/2312-8372.2015.47765.
6. Букарос А.Ю., Ромчук Н.О., Букарос В.Н. Адаптивная система управления электроприводом компрессора. *Автоматизація технологічних і бізнес-процесів*. 2014. Vol. 6. Issue 4. P. 84–90. DOI: 10.15673/2312-3125.
7. Вынгра А.В., Авдеев Б.А. Моделирование пуска электропривода компрессора холодильной установки. *Труды Крыловского государственного научного центра. Специальный выпуск 2*. 2019. С. 143–151. DOI: 10.24937/2542-2324-2019-2-S-I-143-151.
8. Филипас А.А., Осиненко В.В., Кладиев С.Н., Фомин А.А. Расчет нагрузочных характеристик электропривода углового компрессора. *Известия Томского политехнического университета*. 2013. Т. 322. № 2. С. 101–106.
9. Krakowski P. Analysis of selected simulated failure of a reciprocating compressor using computer diagnostic system. *Journal of KONES Powertrain and Transport*. 2018. Vol. 25. № 2. P. 191–198. DOI: 10.5604/01.3001.0012.2800.
10. Котлов А.А. Экспериментальное исследование двухступенчатого поршневого компрессора. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 2019. № 2(707). С. 65–76. DOI: 10.18698/0536-1044-2019-2-65-76.
11. Терехов В.М., Осипов О.И. Системы управления электроприводов: учебник для студентов высших учебных заведений. М. : Академия, 2006. 304 с.
12. Автоматизированный электропривод промышленных установок / Г.Б. Онищенко, М.И. Аксенов, В.П. Греков и др.; под общей ред. Г.Б. Онищенко. М. : РАСХН, 2001. 520 с.
13. Сахарный Н.В. Курс теоретической механики. М. : Высшая школа, 1964. 844 с.
14. Мещерский И. В. Сборник задач по теоретической механике: учебное пособие. Изд. 36-е, исправл. / под ред. Н.В. Бутенина, А.И. Лурье, Д.Р. Меркина. М. : Наука. Гл. ред. Физ.-мат. лит., 1986. 448 с.

Khlopenko N.Ya., Khlopenko I.N. SIMULATION OF TRANSIENT PROCESSES IN A FREQUENCY-CONTROLLED ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE OF A MARINE V-TYPE TWO-STAGE RECIPROCATING COMPRESSOR

Purpose. The aim of the work is to model transient processes in a frequency-controlled asynchronous electric drive of a ship's V-type two-stage reciprocating air compressor with a right angle camber. **Methodology.** For research, a block diagram of a closed-loop frequency control system of an electric drive with a PI-controller was used. The masses of the crank mechanism (CM) and the flywheel with the concentrated masses of the connecting rods reduced to the pistons and the axis of the connecting rod journal have been determined. They were used to calculate the moments of inertia of the rotating and translationally moving masses of the CM reduced to the crank. A classical model of loads on the machine by the crank rotation angle from gravity forces of translationally moving masses was built. The static load on the electric motor was determined. The calculation of air pressures in cylinders by the crank rotation angle acting on the compressor pistons was performed in the MathCAD package using indicator diagrams. The decomposition of these pressures in harmonics into Fourier series with an accuracy of the fifteenth order was carried out. It was also calculated in the same MathCAD package the load on the electric motor from the action of harmonic gas forces depending on the crank rotation angle. A mathematical model of the compressor electric drive with the found loads and moments of inertia of the CM has been built in the Simulink package. From this model the angular velocity of the electric drive shaft was obtained. To determine this angular velocity, the theorem about the change of the kinetic momentum of the system relative to a fixed axis was involved from theoretical mechanics course. The crank rotation angle necessary for calculating of the moments of inertia and loads was determined by time integrating of the angular velocity. It was also used in the built model when the compressor purging process is delayed and when the compression air pressure in the

compressor and its injection into the storage reservoir is calculated. **Results.** Transient processes of torque, load on the crank and angular velocity of the machine were built. Their spread is within tolerances. **Originality.** The mathematical model and the methodic for transient processes in a frequency-controlled asynchronous electric drive of a ship's V-type two-stage reciprocating air compressor with a right angle camber taking into account the action of the friction forces, periodic gas forces and gravity forces of translationally moving masses of the CM are developed. **Practical value.** The obtained diagram for modeling transient processes in a frequency-controlled asynchronous electric drive of a compressor makes it possible to calculate the parameters of the compressed air system in steady-state and transient modes. References 14, figures 7.

Key words: modeling of transient processes, asynchronous electric drive, two-stage compressor, frequency control.

ХІМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 666.3:621.793

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.3/13>

Казимиренко Ю.О.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Лебедєва Н.Ю.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Макруха Т.О.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

ЗАСТОСУВАННЯ ЗОЛЬНИХ МІКРОСФЕР ДЛЯ ФОРМУВАННЯ КОМПОЗИЦІЙНИХ ПОКРИТТІВ НА СТАЛЕВІЙ ПОВЕРХНІ

Стаття присвячена вирішенню важливої науково-технічної проблеми розробки нових композиційних покриттів з використанням виробничих відходів теплових електростанцій – зольних мікросфер. Мікросфери є цінною вихідною сировиною, яку додають до складу сумішей холодного твердіння задля зниження щільності та теплопровідності, здатності гасити динамічні коливання і вібрації, хімічної інертності тощо. Аналіз існуючих технологій показав перспективи застосування електродугового напилення, що дасть змогу розширити сфери застосування композицій. Метою роботи є експериментальне доведення можливостей застосування зольних мікросфер у складі композиційних електродугових покриттів на сталевій поверхні та встановлення закономірностей їх структуроутворення. Для нанесення покриттів використано суцільнотягнуті дроти марок Св-08 і 65Г, як наповнювач – зольні мікросфери алюмосилікатного складу у об'ємній кількості 10...25 %, товщина покриття, напиленого на підкладці зі сталі марки Ст3 становить 1...1,5 мм.

У роботі застосовано методи оптичної та електронної мікроскопії, рентгеноструктурний і мікрорентгеноспектральний аналіз, вимірювання твердості.

Досліджено морфологічні характеристики і фазовий склад обраних мікросфер. Зольні мікросфери алюмосилікатного складу мають мікрокристалічну будову з наявністю модифікацій Al_2O_3 , α - і β -квартцу, α - і β -кварцу. Встановлено, що при напиленні мікросфери зазнають оболікання диспергованими краплями розплавленого металу, проте зберігатимуть сферичну форму, фазовий і хімічний склад; на поверхні поділу зі сталевією матрицею нових фаз не утворюється. Ефективність застосування зольних мікросфер для формування покриттів підтверджується результатами вимірювання твердості. Покриття, наповнені зольними мікросферами, мають підвищену на 8...22 % твердість за Віккерсом. Застосування золошлаків у нових технологіях є перспективним практичним напрямом, реалізація якого допоможе у пошуку дефіцитної мінеральної сировини. Результати досліджень можуть бути корисними для хімічної промисловості, енергетики, технологій судно- та машинобудування.

Ключові слова: мікросфери, покриття, електродугове напилення, виробничі відходи, теплові електростанції.

Постановка проблеми. Ефективна робота українських теплових електростанцій пов'язана з виділенням великої кількості паливних відходів, мінеральні компоненти яких перетворюються на золошлаки, що накопичуються у золовідвалах; це негативно впливає на навколишнє середовище. Тому питання утилізації паливних відходів ставляться дуже гостро. В результаті спалювання частинок вугілля при температурах 1600...1800 °С утворюються складні силікати, які в процесі плав-

лення під дією розчинених у них газів перетворюються на сферичні краплі (мікросфери) з газовою атмосферою в середині, до якої входять азот, кисень, оксид вуглецю [1, с. 28-34]. Мікросфери є цінною вихідною сировиною, яку активно застосовують у своїх технологіях видобувні компанії, будівельна галузь, виробництва з композиційних матеріалів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В роботі [2, с. 212-220] авторами проаналізовано

діяльність Бурштинської, Придніпровської, Трипільської, Криворізької і Чернігівської ТЕС з виробництвом зольних мікросфер та їх просуванням на промислових ринках України, Німеччини, Італії, Словаччини, Казахстану, Республіки Корея, Нідерландів, Республіки Молдова, Румунії та Туреччини. Їх хімічний склад безпосередньо залежить від мінеральних компонентів вугілля, зокрема наявності глинистих мінералів, гідроліод, кварцитів і вмісту кварцу, піриту, доломіту, магнезиту, сидериту, які протягом виробничих процесів зазнають складних хімічних і фазових перетворень, чому присвячено роботи [1, с. 28-34], [3, с. 38-41].

Додавання зольних мікросфер до складу сухих будівельних сумішей та вогнетривів надає їм зниженої щільності та теплопровідності, здатності гасити динамічні коливання і вібрації, хімічної інертності, що обумовлює їх використання у розчинниках, органічних рідинах, кислотах, лугах, воді. Технології виготовлення матеріалів є низькотемпературними і ґрунтуються на високій плинності, компактному укладанні зольних мікросфер, їх здатності гальмувати усадочні процеси при твердінні та полімеризації сумішей. Проте розширити області застосування та надати матеріалам нових експлуатаційних властивостей можливо шляхом поєднання у одній композиції металевих і неметалевих компонентів, що вимагатиме впровадження високотемпературних технологій.

Теоретичними передумовами для створення таких композицій є наукові уявлення про фізико-хімічні процеси з'єднання скла або кераміки з металами [4] [5, с. 18-27], формування полідисперсних композитних середовищ з використанням неметалевих мікросфер [6, с. 21-28; 7, р. 95-97] та власні розробки авторів статті з науково-технічних основ нанесення електродугових покриттів, наповнених порожніми скляними мікросферами на сталеву поверхню [8, с. 41-49]. Завдяки зручності та енергоефективності електродугове напилення вважається перспективним високотемпературним методом, за допомогою якого на металеві покриття можна наносити метал-скляні або метал-керамічні покриття товщиною до 1,5 мм, про що свідчать роботи [9, с. 3-10; 10, с. 9-17]. Дрібнозерниста структура покриттів формується під час плавлення суцільнотягнутих зварювальних дротів через виникнення між ними електричної дуги та перенесення стисненим газом крапель на напилювальну поверхню. Розглянутий в роботах [8-10] досвід включає у себе додавання у зону електричної дуги дисперсних неметалевих частинок, проте

застосування зольних мікросфер у високотемпературних технологіях, зокрема у електродуговому напиленні, ще не було досліджено. Виявлення відмінностей та встановлення закономірностей формування структури нових дисперснонаповнених покриттів може бути корисним для розвитку методів захисту деталей і механізмів у машинобудуванні, енергетиці, хімічній промисловості.

Метою роботи є експериментальне доведення можливостей застосування зольних мікросфер у складі композиційних електродугових покриттів на сталевій поверхні та встановлення закономірностей їх структуроутворення.

Виклад основного матеріалу дослідження. Експериментальні роботи включали у себе формування на підкладці з вуглецевої сталі марки Ст3 (ГОСТ 380-2005) двох видів композиційних покриттів, для чого застосовано суцільнотягнуті дроти найбільш доступних та недорогих сталей (табл. 1), здатних до структурно-фазових перетворень при термодформаційному обробленні. Це дріт пружинно-ресорної сталі ферито-перлітної структури марки 65Г (ГОСТ 14959-79) та низьковуглецевий зварювальний дріт марки Св-08 (ГОСТ 2246-70). Досвід їх застосування для електродугового напилення викладено в роботах [9, с. 3-10], [10, с. 9-17]. Як наповнювач застосовано мікросфери алюмосилікатні «Піносфера» марки МПк200-400 (виробник – ТОВ «Виробниче об'єднання Мікросфери», Україна), які застосовуються в технологіях виготовлення термопанелей, фактурних фарб тощо.

Алюмосилікатні порожні мікросфери (АСПМ) – тверді сипучі частинки світло-сірого кольору з насипною щільністю 50...60 кг/м³ і дисперсністю 200...400 мкм. Для дослідження морфологічних характеристик застосовано методи оптичної металографії з використанням оптичних мікроскопів ММР-2Р і БИОЛАМ-И та рентгеноструктурний аналіз (РСА), виконаний за допомогою установки ДРОН-3 у випромінюванні молібдена $M_{\alpha_1} = 0,071069$ нм з режимами зйомки $U = 40$ кВт, $I = 40$ мА. Ідентифікацію фаз здійснено за допомогою картотеки ASTM (Published by the American Society for testing materials) та шляхом зіставлення результатів РСА з діаграмами стану алюмосилікатних матеріалів [11, р. 96-104].

Результати мікроструктурного аналізу з обробкою цифрових зображень (рис. 1) статистичними засобами візуалізації показали навіть ідеальну сферичність дослідних частинок, гаусівський розподіл яких за діаметром складатиме: 80 % – 200...300 мкм; 20 % – 300...400 мкм.

Таблиця 1

Хімічний склад вихідних матеріалів

| Матеріали | Хімічний склад, мас.%, % |
|----------------------------------|---|
| Сталева підкладка | |
| Ст3 (ГОСТ 380-2005) | C – 0,14...0,22; Mn – 0,30...0,60; Si – не більше 0,05; Fe – основа |
| Зварювальний дріт | |
| 65Г (ГОСТ 14959-79) | C – 0,62...0,7 %; Si – 0,17...0,37 %; Mn – 0,9...1,2 %; Cr не більше 0,25 %; Fe – основа |
| Св-08 (ГОСТ 2246-70) | C – 0,5...0,12 %; Si – 0,17...0,37 %; Mn – 0,35...0,65 %; Cr не більше 0,1 %; Fe – основа |
| Наповнювач | |
| АСПМ (ТУ 5717-001-11842486-2006) | SiO ₂ – 74,9%; Al ₂ O ₃ – 13,9%; K ₂ O – 2,8%; Na ₂ O – 1,9%; Fe ₂ O ₃ – 0,9%; CaO – 1,2%; FeO – 0,6%; TiO ₂ – 0,2% |

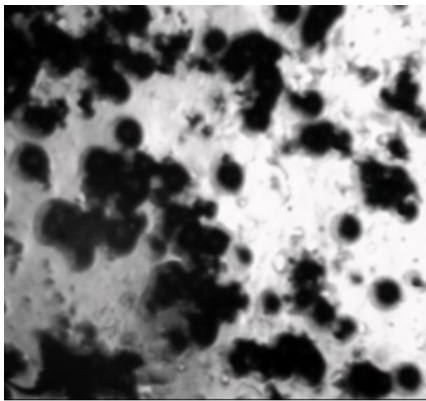


Рис. 1. Оптична мікрофотографія мікросфер, ×100

Рентгеноструктурний аналіз довів загальну рентгеноаморфність мікросфер, проте показав наявність на дифрактограмах ліній α - і β -кварту, α - і β -кварцу, та кристалічних модифікацій Al₂O₃ (табл. 2).

Покриття товщиною 1...1,5 мм нанесено з одного боку на попередньо оброблені струменево-абразивною обробкою пластини зі сталі Ст3 розміром 10×140×3 мм. Технологічні режими електродугового напилення підібрані згідно з рекомендаціями авторів робіт [9, с. 3-10], [10, с. 9-17]: сила струму – 80; 120; 160 А; тиск повітря – 0,4; 0,5; 0,6 МПа; витрати мікросфер – 150 г/хв; швидкість подачі дроту – 4,2 м/хв; відстань від сопла до напилювальної поверхні – 80 мм.

Варіювання величинами сили струму та тиску повітря дає змогу отримувати зразки з різним наповненням мікросферами: від 10 до 25 %. Експериментальні роботи показали схильність алюмосилікатних мікросфер утворювати конгломерати та великий відсоток втрат матеріалу при напиленні (більше 50 %), що не дозволяє точно розраховувати дозування та точний об'ємний вміст і являє собою певні технологічні труднощі.

Таблиця 2

Результати рентгеноструктурного аналізу АСПМ

| Кут відбивання, 2 θ , ° | Міжплощинна відстань, d , Å | Кристалічні модифікації |
|--------------------------------|-------------------------------|--|
| 16,7 | 2,447 | γ -Al ₂ O ₃ |
| 16,9 | 2,4189 | SiO ₂ (α -кварту) |
| 17,05 | 2,397 | γ -Al ₂ O ₃ |
| 19,45 | 2,1036 | α -Al ₂ O ₃ |
| 20,45 | 2,00183 | γ -Al ₂ O ₃ |
| 20,65 | 1,9826 | γ -Al ₂ O ₃ |
| 22,3 | 1,837 | SiO ₂ (β -кварту) |
| 22,55 | 1,817 | SiO ₂ (α -кварту) |
| 22,75 | 1,8016 | SiO ₂ (α -кварту) |
| 24,95 | 1,645 | SiO ₂ (β -кварту) |
| 26,275 | 1,563 | SiO ₂ (β -кварту) |
| 29,35 | 1,402 | γ -Al ₂ O ₃ |
| 30,00 | 1,372 | γ -Al ₂ O ₃ |

Топографію напиленої поверхні досліджено методами електронної мікроскопії, фазовий склад вивчено на відокремлених від підкладки зразках за допомогою РСА. Хімічний склад мікрообластей навколо мікросфер досліджено з використанням мікрорентгеноспектрального аналізу (МРСА) за допомогою мікроскопа-мікроаналізатора РЭММА-102-02. Об'ємне наповнення покриттів мікросферами визначено точковим аналізом з обробкою цифрових мікрофотографій, зроблених за допомогою оптичного мікроскопа БИОЛАМ-І.

Напилені покриття на основі Св-08 і 65Г матимуть схожу полідисперсну пористу структуру (рис. 2) зі сферичними включеннями, які за результатами РСА не зазнають фазових перетворень. Інтенсивність на рентгенограмах спектрів Fe (111) свідчить про набуття мікросферами ефекту поверхневої металізації через обволікання диспергованим розплавленим металом, який при

попаданні на сталеву підкладку, охолоджується з утворенням мікроб'ємів зі сферичними включеннями.

На поверхні поділу між сталеву матрицею та мікросферами нових хімічних сполук не утворено, що показує відсутність протікання процесів міжфазної взаємодії під час електродугового наплення; це також підтверджується результатами МРСА. На рис. 3, як приклад, наведено спектрограму з поверхні мікросфери у складі покриття на основі Св-08.

Результати досліджень порівняно з особливостями структури електродугових покриттів, наповнених скляними мікросферами та порошками [8, с. 41-49]. Визначено, що структуроутворення дослідних покриттів на відміну від метал-скляних композицій не пов'язано з ліквідаційними процесами у АСПМ: при короткочасному попаданні у зоні електродугового струменя у стінках мікросфер не відбувається утворення склофазы, наяв-

ність якої сприятиме зміцненню адгезійних і когезійних зав'язків.

Ефект від наповнення електродугових покриттів зольними мікросферами визначено за результатами вимірювань твердості HV_5 (табл. 3), для чого застосовано прилад ТП з навантаженням на індентор 5 кг та використано спеціально підготовлені поперечні мікрошліфи; погрішність вимірювань не перевищувала $\pm 10\%$.

Таблиця 3

Твердість покриттів

| HV_5 , ГПа | Покриття без наповнювача | Покриття з АСПМ (об'ємн. 18 %) |
|--------------|--------------------------|--------------------------------|
| Св-08 | 2,10 | 2,56 |
| 65Г | 2,50 | 2,70 |

Порівняння результатів з покриттями без наповнювача показали підвищення твердості на 8...22 %, що можна пояснити формуванням

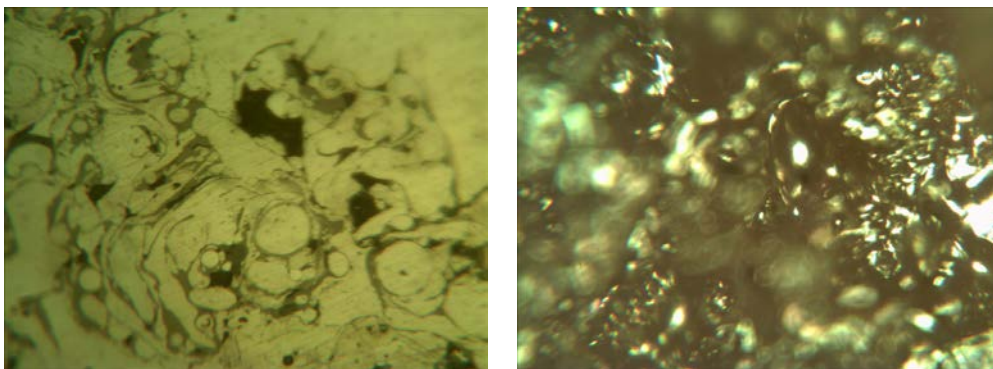


Рис. 2. Оптичні мікрофотографії покриттів, наповнених АСПМ: а – поперечного шліфа ($\times 350$) композиції з Св-08; б – топографії поверхні ($\times 150$) композиції з 65Г

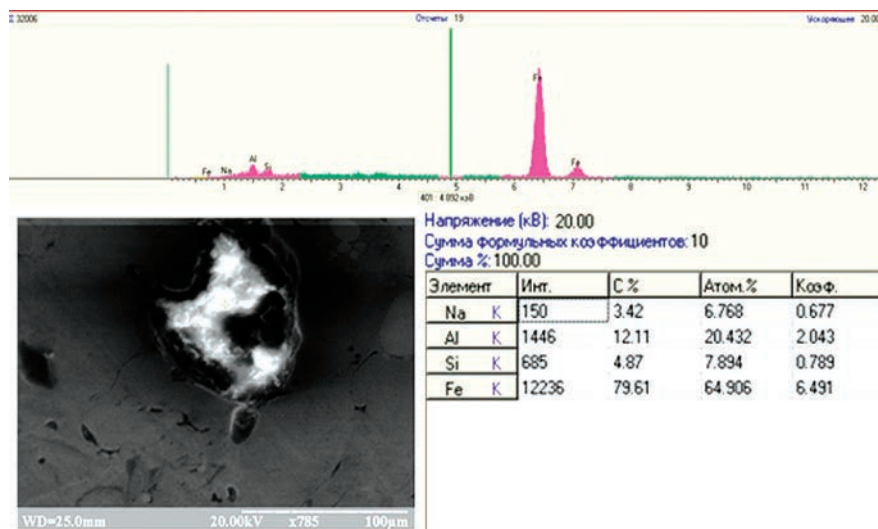


Рис. 3. Результати МРСА з поверхні мікросфери у складі електродугового покриття на основі Св-08

мікронапружень навколо сферичного включення у гартівній структурі сталевій матриці, які виникають через різницю у значеннях температурних коефіцієнтів лінійного розширення.

Перспективи подальших робіт пов'язано з дослідженнями їх фізико-механічних властивостей.

Застосування зольних мікросфер в технологіях нанесення функціональних покриттів матиме суттєвий економічний і соціальний ефект, одночасно пов'язаний зі створенням нових композицій з використанням дешевих матеріальних ресурсів і визначенням шляхів утилізації відходів ТЕС. Одержані покриття можуть бути застосовані у хімічній промисловості, енергетиці, судно- і машинобудуванні.

Результати досліджень виявляють закономірності структуроутворення покриттів з Св-08 і 65Г з додаванням зольних мікросфер алюмосилікатного складу, нанесених на сталеву підкладку з Ст3 електродуговим методом, що спрямовано на вирішення актуальної науково-технічної проблеми розробки нових покриттів, для формування яких

використовуються виробничі відходи ТЕС. Застосування золошлаків у нових технологіях є перспективним практичним напрямом, реалізація якого допоможе у пошуку дефіцитної мінеральної сировини.

Висновки

1. Експериментально доведено можливість додавання до складу електродугових покриттів з Св-08 і 65Г зольних мікросфер алюмосилікатного складу у об'ємній кількості 10...25 %.

2. Визначено закономірності формування структури композиційних покриттів на сталевій підкладці з Ст3: при напыленні мікросфери зазнають обволікання диспергованими краплями розплавленого металу, проте зберігатимуть сферичну форму, мікрористалічну будову, фазовий і хімічний склад; на поверхні поділу між стінкою та сталеву матрицею нових фаз не утворюється.

3. Ефективність застосування зольних мікросфер для формування покриттів визначаються підвищеною на 8...22 % твердістю за Віккерсом, економічним і соціальним значеннями.

Список літератури:

1. Демченко В. О., Сімячко О. І., Свідерський В. А. Дослідження мінералогічного складу, структури і властивості поверхні зольних мікросфер України. *Технологічний аудит і резерви виробництва*. 2017. 6. С. 28-34.
2. Мережко Н. В., Школа В. М. Ринок зольних мікросфер України. *Товарознавчий вісник*. 2019. 12. С. 212-220.
3. Демченко В. О. Формування споживчих властивостей вітчизняних зольних мікросфер. *Вісник Львівського торговельно-економічного університету (ЛТЕУ). Технічні науки*. 2016. 17. С. 38-41.
4. Касяненко В. В., Кузьмичев А. І. Способи металізації кераміки, використані при виробництві силових електронних модулів і електровакuumних приладів. *ЛОГОС. ОНЛАЙН*. 2020. 15. URL: <https://www.ukrlogos.in.ua/10.11232-2663-4139.15.12.htm> (дата звернення 11.04.2022).
5. Красовський В. П., Габ І. І., Стецюк Т. В., Красовська Н. О. Змочування кварцового скла легкоплавкими припійними розплавами. *Адгезія розплавів і пайка матеріалів*. 2017. 50. С. 18-27.
6. Баглюк Г. А., Максимова Г. А., Куровський В. Я. Особливості структуроутворення при спіканні багатоконпонентних залізоокисних композитів. *Металознавство та обробка металів*. 2016. 4. С. 21-28.
7. An Z., Zhang J. Glass/Ni-P/Co-Fe-P three layer hollow microspheres: Controlled fabrication and magnetic properties. *Materials Letters*. 2012. 85. P. 95-97.
8. Казимиренко, Ю. О., Лебедева Н. Ю. Вплив високотемпературних технологій на структуру порожніх мікросфер. *East European Scientific Journal Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe*. 2018. 5 (33). 1. P. 41-49.
9. Дубовий О. М., Карпеченко А. А., Бобров М. М., Шкурат С. І., Лимар О. О. Формування термічної поліганізаційної субструктури з підвищеними властивостями в електродугових покриттях. *Вісник НТУ «ХПІ»*. 2019. 10 (1335). С. 3-10.
10. Карпеченко А. А., Бобров М. М., Дубовий О. М., Макруха Т. О., Неделько Є. Ю. Формування композиційних металокерамічних металокарбідних електродугових покриттів. *Вісник НТУ «ХПІ»*. 2021. 1 (7). С. 9-17.
11. Саввова О. В., Логвінков С. М., Бабіч О. В., Здорик А. Р. Особливості зміни фазового складу магній-алюмосилікатних склокристалічних матеріалів при термічному обробленні. *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*. 2018. 3. P. 96-104.

Kazymyrenko Yu.O., Lebedeva N.Yu., Makrukha T.O. APPLICATION OF ASH MICROSPHERES FOR FORMATION OF COMPOSITE COATINGS ON STEEL SURFACE

The article is devoted to solving an important scientific and technical problem of new composite coatings development using ash microspheres - industrial waste from thermal power plants. Microspheres are a valuable

raw material, which is added to cold-curing mixtures to reduce density and thermal conductivity, the ability to dampen vibrations, chemical inertness and more. Analysis of existing technologies has shown the prospects for the electric-arc spraying usage; that will expand the compositions scope of applications usage. The aim of the work is to experimentally prove the possibilities of using ash microspheres in the composition of composite electric-arc coatings on a steel surface and to establish the laws of their structure formation. All-drawn wires of Sv-08 and 65G brands were used for coating; ash microspheres of aluminosilicate composition in the volume of 10... 25% were used as a filler; the thickness of the coating sprayed on a substrate of steel grade St3 is 1... 1.5 mm. The methods of optical and electron microscopy, X-ray structural and micro-X-ray spectral analysis, hardness measurement have been used in the work.

The morphological characteristics and phase composition of selected microspheres have been studied. Ash microspheres of aluminosilicate composition have a microcrystalline structure with the presence of modifications of Al₂O₃, α - and β -cristobalite, α - and β -quartz. It was found that when the microspheres are sprayed, they are enveloped by dispersed drops of molten metal, but retain their spherical shape, phase and chemical composition; no new phases are formed on the interface between the wall and the steel matrix. The effectiveness of ash microspheres for the formation of coatings is confirmed by the results of hardness measurements. Coatings filled with ash microspheres have increased Vickers hardness by 8... 22%. Usage of ash slag in new technologies is a promising practical area, which implementation will help in the scarce minerals search. The research results can be useful for the chemical industry, energy, shipbuilding and mechanical engineering.

Key words: *microspheres, coatings, electric-arc spraying, industrial waste, thermal power plants.*

УДК 577.352.2

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.3/14>**Лебедєв В.В.**

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Мірошниченко Д.В.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Савченко Д.О.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Тихомирова Т.С.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ГІБРИДНИХ ЕКОЛОГІЧНО ЧИСТИХ БІОДЕГРАДАБЕЛЬНИХ ПЛІВОК З БАКТЕРИЦИДНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ

У статті показані дослідження щодо розроблення новітніх гібридних екологічно чистих біодеградабельних плівок з бактерицидними властивостями на основі полівінілового спирту, модифікованих гуміновими кислотами бурого вугілля. Гібридні екологічно чисті біодеградабельні плівки з бактерицидними властивостями отримували методом поливу розчинів полівінілового спирту з концентрацією 10 % мас., до яких додавали різну кількість гумінової кислоти. При одержанні гібридних екологічно чистих біодеградабельних плівок з бактерицидними властивостями використовували полівініловий спирт (Kuraray, Японія) марки «Mowiol 6-98» (марка Clariant) зі ступенем гідролізу 98,4 %, вмістом твердої речовини 98,9 % та молекулярною масою (M_w) 150000. Як гібридні модифікатори використовували гумінові кислоти, які отримували при екстракції бурого вугілля лужним розчином пірофосфату натрію з подальшою екстракцією 1 %-ним розчином гідроксиду натрію і осадженням мінеральної кислотою. Ефект гібридної модифікації полівінілового спирту гуміновими кислотами бурого вугілля з точки зору досліджених експлуатаційних характеристик збільшувався в напрямі типів гумінових кислот бурого вугілля № 3 > № 2 > № 1. Показано, що гібридна модифікація за механізмом матричного синтезу біоплівок на основі полівінілового спирту гуміновими кислотами бурого вугілля дозволяє знизити їх водопоглинання, збільшити основні міцності характеристики та надати їм антибактеріальні властивості, що підтверджується даними за показником часу появи плісняви у плівках. Оптимальним з погляду міцностних та експлуатаційних характеристик є гібридні екологічно чисті біодеградабельні плівки з бактерицидними властивостями при вмісті 10 % мас. гумінових кислот № 3. Результати дослідження біодеградації дозволили довести, що гібридна модифікація полівінілового спирту гуміновими кислотами бурого вугілля при наданні їм антибактеріальних властивостей дозволяє зберегти в них властивості до біодеградації для усіх типів досліджених гумінових кислот бурого вугілля.

Ключові слова: гібридні, екологічно чисті, біодеградабельні плівки, полівініловий спирт, бактерицидні властивості, гумінові кислоти.

Постановка проблеми. Один із найбільш затребуваних матеріалів сьогодні на планеті є полімери та пластики, які при відмінних експлуатаційних характеристиках впродовж терміну використання, в післяексплуатаційний період призводять до накопичення значної кількості відходів на їх основі [1, с. 2654]. У зв'язку з цим у наукових та промислових колах сформувався новий підхід до розробки екологічно чистих полімерних біодеградабельних матеріалів, які при стабільних та високих експлуатаційних характеристиках впродовж терміну використання та здатних

потім до деструкції під дією факторів довкілля. Прикладом таких матеріалів є біодеградабельні плівки на основі природних полімерів [2, с. 1156]: крохмаль, целюлоза, хітозан та ін. З таких матеріалів в даний час отримують широкий асортимент пакувальних біодеградабельних плівок для харчових та інших продуктів. В той же час такі пакувальні біодеградабельні плівки з антибактеріальною дією для довготривалого зберігання харчових продуктів сьогодні мають обмежене розповсюдження. Саме тому на сьогодні залишається актуальною проблема одержання біодеградабельних

плівок з бактерицидними властивостями для пакування широкого кола харчових продуктів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В сучасній науковій літературі є деякі дослідження з виробництва пакувальних біодеградабельних плівок з бактерицидними властивостями. Так, були розроблені плівки на основі крохмалю або полімолочної кислоти, які збільшують термін збереження зеленого перцю та мінімально обробленого салату, описані у [3, 153]. Також було встановлено [4, с. 292], що змішування крохмалю з альгінатом дозволяє отримати плівки, які були б більш стійкими до розтягування, менш проникними для водяної пари та менш гідрофільними, ніж плівки, які містять лише крохмаль. В той же час, дуже перспективним синтетичним матеріалом для виробництва пакувальних біоплівків з бактерицидними властивостями є полівініловий спирт (ПВС) – універсальний полімер з великим промисловим застосуванням [5, с. 665], який отримують лише шляхом синтезу, при цьому основний ланцюг ПВС містить зв'язки С-С, які сприяють швидку його біодеградацію [6, с. 511]. В наших попередніх роботах були розроблені та досліджені гібридні екологічно чисті біодеградабельні плівки на основі ПВС [7, с. 953] та гідроксипропілметилцелюлози [8, с. 23], які були модифіковані гуміновими кислотами бурого вугілля України [9, с. 646]. В цих роботах була встановлена також антибактеріальна дія гумінових кислот у досліджених полімерах.

Постановка завдання. Отже, метою статті є розробка та дослідження гібридних екологічно чистих біодеградабельних плівок з бактерицидними властивостями.

Завдання статті:

– виявлення впливу модифікації гуміновими кислотами на комплекс міцностних та експлуатаційних властивостей гібридних екологічно чистих біодеградабельних плівок гібридних екологічно чистих біодеградабельних плівок з бактерицидними властивостями на основі ПВС з бактерицидними властивостями на основі ПВС,

– визначення ступеня біодеградації розроблених гібридних екологічно чистих біодеградабельних плівок з бактерицидними властивостями на основі ПВС.

Виклад основного матеріалу дослідження. Гібридні екологічно чисті біодеградабельні плівки з бактерицидними властивостями отримували методом поливу розчинів ПВС з концентрацією 10 % мас., до яких додавали різну кількість гумінової кислоти: 5, 10, 15 % мас.

При одержанні гібридних екологічно чистих біодеградабельних плівок з бактерицидними властивостями використовували полівініловий спирт (Kuraray, Японія) марки «Mowiол 6-98» (марка Clariant) зі ступенем гідролізу 98,4 %, вмістом твердої речовини 98,9 % та молекулярною масою (Mw) 150000.

Як гібридні модифікатори використовували гумінові кислоти, які отримували при екстракції бурого вугілля лужним розчином пірофосфату натрію з подальшою екстракцією 1 %-ним розчином гідроксиду натрію і осадженням мінеральної кислотою. В таблиці 1 наведена характеристика дослідних зразків бурого вугілля різного ступеня метаморфізму.

Таблиця 1
Технічний аналіз бурого вугілля*

| Зразок вугілля | Технічний аналіз, % | | | |
|----------------|---------------------|-------|---------|-------|
| | W^a | A^d | S_t^d | V^d |
| 1 | 16,8 | 48,7 | 2,50 | 29,1 |
| 2 | 8,1 | 8,3 | 1,87 | 43,7 |
| 3 | 30,6 | 36,7 | 4,00 | 43,7 |

W^a – волога на аналітичний стан, %; A^d – зольність на сухий стан, %; S_t^d – вміст сірки на сухий стан, %; V^d – вихід летких речовин на сухий беззолний стан, %.

Необхідно зазначити, що зразки бурого вугілля дещо різняться, а саме: вміст аналітичної вологи коливається від 8,1 до 30,6 %; зольність від 8,3 до 48,7 %; вміст загальної сірки від 1,87 до 4,00 %; вихід летких речовин від 29,1 до 43,7 %. Показники елементного аналізу та виходу гумінових кислот коливаються в залежності від виходу летких речовин. Визначення водопоглинання зразків біоплівків у холодній воді проводили згідно ISO 62:2008. Міцностні властивості при розтягуванні біоплівків визначали згідно ISO 527-2:2021. Випробування проводилися на розривній машині IP 5040-5 у режимі одноосового розтягування за температури 22 °С. Швидкість випробування зразків – 25 мм/хв. Визначали відносно подовження при розриві (%) та міцність при розриві (МПа). Для вимірювання газопроникності плівок по кисню використовували метод диференціального тиску та вакуумний тестер VAC-V1. Вакумування здійснювали протягом 8 годин. Для виміру ступенів біодеградації використовували метод, описаний в ISO 846:1997.

Були проведені дослідження оптимізації складу гібридних екологічно чистих біодеградабельних плівок з бактерицидними властивостями з визначення впливу гібридної модифікації гумінових кислот бурого вугілля на найбільш

важливі характеристики: водопоглинання, міцність при розриві, відносне подовження при розриві, часу появи цвілі ті ступеня біодеградабельності. Графічна залежність водопоглинання, міцності при розриві, відносного подовження при розриві та часу появи цвілі в гібридних екологічно чистих біодеградабельних плівок з бактерицидними властивостями від вмісту різних типів гумінових кислот бурого вугілля наведена на рис. 1-4.

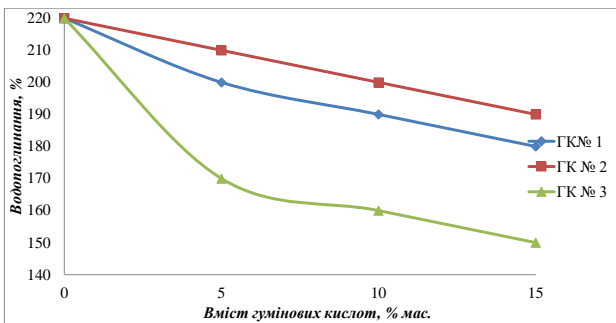


Рис. 1. Графічна залежність водопоглинання гібридних екологічно чистих біодеградабельних плівок з бактерицидними властивостями на основі ПВС від вмісту різних типів гумінових кислот бурого вугілля

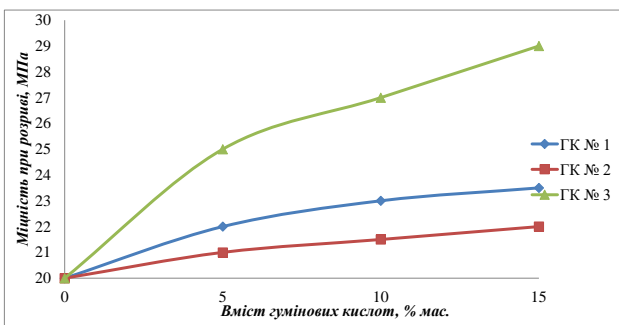


Рис. 2. Графічна залежність міцності при розриві гібридних екологічно чистих біодеградабельних плівок з бактерицидними властивостями на основі ПВС від вмісту різних типів гумінових кислот бурого вугілля

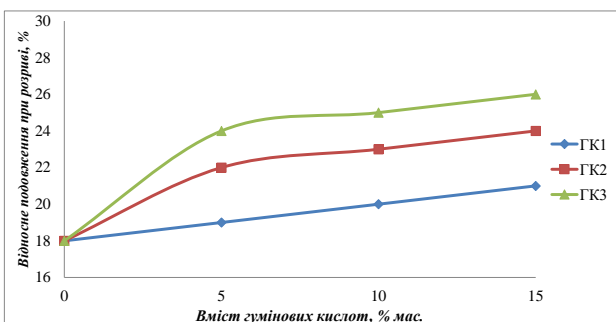


Рис. 3. Графічна залежність відносного подовження при розриві гібридних екологічно чистих біодеградабельних плівок з бактерицидними властивостями на основі ПВС від вмісту різних типів гумінових кислот бурого вугілля

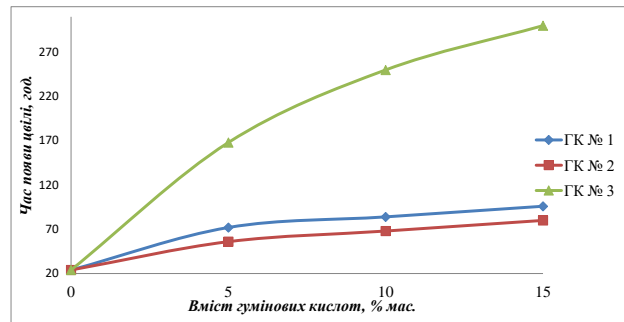


Рис. 4. Графічна залежність часу появи цвілі гібридних екологічно чистих біодеградабельних плівок з бактерицидними властивостями на основі ПВС від вмісту різних типів гумінових кислот бурого вугілля

Результати отриманих досліджень дозволили зробити висновок про те, що гібридна модифікація ПВС гуміновими речовинами бурого вугілля дозволяє підвищити основні експлуатаційні характеристики гібридних екологічно чистих біодеградабельних плівок з бактерицидними властивостями, при цьому такі плівки стають більш водостійкими, характеризуються підвищеним комплексом міцностних характеристик та надають їм бактерицидних властивостей. Ефект гібридної модифікації ПВС гуміновими кислотами бурого вугілля з точки зору досліджених експлуатаційних характеристик збільшується в напрямі типів гумінових кислот бурого вугілля № 3>№ 2>№ 1.

На рис. 5 наведено дослідження газопроникності гібридних екологічно чистих біодеградабельних плівок з бактерицидними властивостями на основі ПВС, з якого видно, що за рахунок підвищення інтенсивності процесів структуроутворення при гібридній модифікації спостерігається збільшення газопроникності усіх плівок. Ефект збільшення газопроникності гібридних екологічно чистих біодеградабельних плівок з бактерицидними властивостями на основі ПВС залежно від властивостей гумінових кислот бурого вугілля і збільшується в напрямі різних типів № 3>№ 2>№ 1. При цьому, оптимальним з погляду міцностних та експлуатаційних характеристик є гібридні екологічно чисті біодеградабельні плівки з бактерицидними властивостями при вмісті 10 % мас. гумінових кислот № 3.

В табл. 1 наведені результати о дослідження біодеградації гібридних екологічно чистих біодеградабельних плівок з бактерицидними властивостями на основі ПВС вмісту різних типів гумінових кислот бурого вугілля. З результатів дослідження біодеградації видно, що гібридна модифікація ПВС гуміновими кислотами бурого

вугілля при наданні їм антибактеріальних властивостей дозволяє зберегти в них властивості до біодеградації для усіх типів досліджених гумінових кислот бурого вугілля.

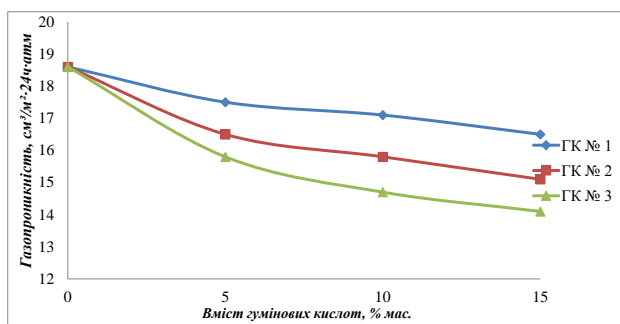


Рис. 5. Залежність газопроникності гібридних екологічно чистих біодеградабельних плівок з бактерицидними властивостями на основі ПВС від вмісту гумінових кислот бурого вугілля

Таким чином, в результаті проведених досліджень показано, що гібридна модифікація гуміновими кислотами бурого вугілля за механізмом матричного синтезу біоплівки на основі дозволяє отримати міцні водостійкі плівки з антибактеріальними властивостями.

Висновки. Загалом, в результаті проведених досліджень були розроблені новітні гібридні екологічно чисті біодеградабельні плівки з бактерицидними властивостями на основі ПВС, модифіковані гуміновими речовинами бурого вугілля. Показано, що гібридна модифікація за механізмом матричного синтезу біоплівки на основі ПВС гуміновими кислотами бурого вугілля дозволяє знизити їх водопоглинання, збільшити основні міцності характеристики та надати їм антибактеріальні властивості, що підтверджується даними за показником часу появи плісняви у плівках. Оптимальним з погляду міцностних та експлуатаційних

Таблиця 2

Результати о дослідження біодеградації гібридних екологічно чистих біодеградабельних плівок з бактерицидними властивостями на основі ПВС вмісту різних типів гумінових кислот бурого вугілля, втрата ваги % мас

| Тип гумінових кислот бурого вугілля | Час біодеградації, міс | Вміст гумінових кислот бурого вугілля, % мас. | | |
|-------------------------------------|------------------------|---|----|----|
| | | 5 | 10 | 15 |
| № 1 | 1 | 55 | 53 | 51 |
| | 2 | 64 | 63 | 61 |
| | 3 | 72 | 71 | 70 |
| | 4 | 81 | 80 | 78 |
| | 5 | 89 | 88 | 87 |
| | 6 | 93 | 92 | 91 |
| № 2 | 1 | 50 | 48 | 45 |
| | 2 | 60 | 58 | 55 |
| | 3 | 70 | 68 | 65 |
| | 4 | 80 | 78 | 75 |
| | 5 | 88 | 86 | 85 |
| | 6 | 93 | 92 | 91 |
| № 3 | 1 | 50 | 48 | 45 |
| | 2 | 60 | 58 | 55 |
| | 3 | 70 | 68 | 65 |
| | 4 | 80 | 78 | 75 |
| | 5 | 88 | 86 | 85 |
| | 6 | 93 | 92 | 91 |

характеристик є гібридні екологічно чисті біодеградабельні плівки з бактерицидними властивостями при вмісті 10 % мас. гумінових кислот № 3. Результати дослідження біодеградації дозволили довести, що гібридна модифікація ПВС гуміновими кислотами бурого вугілля при наданні їм антибактеріальних властивостей дозволяє зберегти в них властивості до біодеградації для усіх типів досліджених гумінових кислот бурого вугілля.

Список літератури:

1. Cabrera F.C. Eco-friendly polymer composites: A review of suitable methods for waste management. *Polymer Composites*. 2021. Vol. 42. P. 2653–2677.
2. Anukiruthika T., Sethupathy P., Wilson A., Kashampur K., Moses J.A., Anandharamkrishnan C. Multilayer packaging: Advances in preparation techniques and emerging food applications. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2020. Vol. 19 (3). P. 1156–1186.
3. Marcos B., Aymerich T., Monfort J. M., Garriga M.. Use of antimicrobial biodegradable packaging to control *Listeria monocytogenes* during storage of cooked ham. *International Journal of Food Microbiology*. 2007. Vol. 120 (1–2). P. 152–158.
4. Falguera V., Quintero J.P., Jimenez A., Munoz J.A., Ibarz A. Edible films and coatings: structures, active function and trends in their use. *Trends in Food Science & Technology*. 2011. Vol. 22 (6). P. 292–303.
5. Debiagi F., Kobayashi R.K.T., Nakazato G., Panagio L.A., Mali S. Biodegradable active packaging based on cassava bagasse, polyvinyl alcohol and essential oil. *Industrial Crops and Products*. 2014. Vol. 52. P. 664–670.
6. Brandelero R.P.H., Brandelero E.M., de Almeida F.M. Biodegradable films of starch/PVOH/alginate in packaging systems for minimally processed lettuce (*Lactuca sativa L.*). *Ciencia e Agrotecnologia*. 2016. Vol. 40 (5). P. 510–521.

7. Lebedev V., Miroshnichenko D., Xiaobin Zhang, Pyshyev S., Savchenko D., Nikolaichuk Y. Use of Humic Acids from Low-Grade Metamorphism Coal for the Modification of Biofilms Based on Polyvinyl Alcohol. *Petroleum and Coal*. 2021. № 63 (4). P. 953-962.

8. Чжан Сяобін, Лебедєв В.В., Мірошніченко Д.В. Використання гумінових кислот для модифікації біоплівки, виготовлених на основі полівинілового спирту та гідроксипропілметилцелюлози. *Вуглехімічний журнал*. 2021. № 6. С. 22-37.

9. Lebedev V., Miroshnichenko D., Xiaobin Zhang, Pyshyev S., Savchenko D. Technological Properties of Polymers Obtained from Humic Acids of Ukrainian Lignite. *Petroleum and Coal*. 2021. № 63 (3). P. 646-654.

Lebedev V.V., Miroshnichenko D.V., Savchenko D.O., Tykhomyrova T.S.

DESIGN AND RESEARCHING OF HYBRID ECO-FRIENDLY BIODEGRADABLE FILMS WITH BACTERICIDAL PROPERTIES

The article shows investigations in the field of developing the hybrid eco-friendly biodegradable films with bactericidal properties based on polyvinyl alcohol, modified with humic acids of brown coal. Hybrid eco-friendly biodegradable films with bactericidal properties were obtained by watering polyvinyl alcohol solutions with a concentration of 10% wt., to which were added different amounts of humic acid. Polyvinyl alcohol (Kuraray, Japan) of the Mowiol 6-98 brand (Clariant brand) with a hydrolysis rate of 98.4%, a solids content of 98.9% and a molecular weight 150000 Mw was used to obtain hybrid eco-friendly biodegradable films with bactericidal properties. As hybrid modifiers used humic acids, which were obtained by extraction of brown coal with an alkaline solution of sodium pyrophosphate, followed by extraction with 1% sodium hydroxide solution and precipitation with mineral acid. The effect of hybrid modification of polyvinyl alcohol by brown coal humic acids in terms of the studied performance characteristics increased in the direction of the types of brown coal humic acids No.3>No.2>No.1. It is shown that hybrid modification by the mechanism of matrix synthesis of biofilms based on polyvinyl alcohol with humic acids of brown coal allows reducing their water absorption, increase basic strength and give them antibacterial properties, which is confirmed by data on mold time in films. Hybrid eco-friendly biodegradable films with bactericidal properties at a content of 10% of the mass are optimal in terms of strength and performance characteristics humic acids No.3. The results of the study of biodegradation showed that the hybrid modification of polyvinyl alcohol by brown humic acids while providing them with antibacterial properties allows retaining their biodegradation properties for all types of studied humic acids.

Key words: hybrid, eco-friendly, biodegradable films, polyvinyl alcohol, bactericidal properties, humic acids.

Штефан В.В.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Баламут Н.С.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Кануннікова Н.О.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Кобзев О.В.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

ІМПУЛЬСНИЙ ЕЛЕКТРОЛІЗ ХРОМОКСИДНОГО ПОКРИТТЯ НА НЕРЖАВІЮЧИЙ СТАЛІ

Металоксидні матеріали часто використовуються для різних цілей у військовій техніці, що дають цікаві результати, особливо завдяки їх міцності, корозійної стійкості, низькій питомій вазі та іншим властивостям. Так поширеним використанням оксидних покриттів є, наприклад, виготовлення ствола автоматичної стрілецької зброї. Основними галузями застосування металоксидних покриттів є машинобудування, хімічна, нафтохімічна, автомобільна, металургійна промисловості, медицина, радіоелектроніка, будівництво тощо. Діапазон застосування цих матеріалів збільшується з кожним днем та можна з певністю заявити, що це матеріали майбутнього.

Нержавіюча сталь використовується у всіх сферах діяльності людини, починаючи від важкого машинобудування і закінчуючи електронікою та механікою. Дослідження закономірностей кінетики формування металоксидних покриттів на сталі важливо, оскільки вони мають практичну значимість в таких технологіях, як обробка поверхні матеріалів і електрохімічний захист металів і сплавів від корозії. Відсутність достовірних відомостей про кінетику та механізми формування металоксидних покриттів високолегованих нержавіючих сталей є актуальним, оскільки вони повинні бути в основі прогнозування властивостей покриттів та розробки протикорозійного захисту. Особливо важливі такі дослідження для електрохімічних процесів, в яких склад реакційних мас в ході формування матеріалу змінюються і, відповідно, змінюється його властивості. Імпульсні умови ведення електролізу допомагають зрозуміти фактори впливу режиму процесу на процес формування металоксидної поверхні. В роботі показано вплив параметрів нестационарного електролізу, таких як, амплітуда, скважність, тривалість імпульсу та паузи, наявність зворотного імпульсу на структуру на текстурі поверхні хромвмісних покриттів. Експериментально доведено, що величина скважності має домінуючий вплив на осадження суцільного катодного шару. Дослідження морфології показали, що за текстурою осад формується у вигляді глобул, розмір яких залежить від параметрів режиму імпульсного електролізу.

Ключові слова: сталь, хромоксидне покриття, морфологія, імпульсний електроліз.

Постановка проблеми. Серед численних корозійностійких сталей і сплавів найбільше застосування в різних галузях промисловості всіх технічно розвинених країн знайшли аустенітні хромонікелеві сталі типу 08X18H10 і їх модифікації. Ці сталі відповідають найрізноманітнішим споживчим вимогам і в сучасній техніці в багатьох випадках незамінні. Однією з основних причин використання нержавіючих сталей в промисловості є їх стійкість проти різних видів корозійного руйнування.

Протягом останніх десятиліть інженерія поверхні стала однією з основних напрямків поліп-

шення фізико-хімічних властивостей матеріалів з урахуванням їх прогнозованого призначення. Аустенітні нержавіючі сталі є одними з найбільш затребуваних сплавів в широкому спектрі застосувань, таких як ріжучі інструменти, ротори лопаті газових турбін, деталі літаків, автомобілів, трубопроводів, військово-морських суден, конструкційні матеріали енергетичного обладнання [1-3]. Важливим кроком досягнення максимального захисту матеріалів і, отже, збільшення терміну їх служби в хімічно агресивних середовищах є електроосадження хромвмісних металоксидних покриттів.

Надмірна кількість перехідних металів, таких як Cr і Fe в сталі можуть впливати на хімічну стабільність покриттів. Збільшення Cr може значною мірою сприяти утворенню пасивного шару Cr_2O_3 , виконуючи роль корозійно-захисного шару. Надмірна кількість Fe у складі покриттів може викликати його окислення до FeO, який в агресивних умовах може призвести до корозії, що ще більше обмежить її продуктивність і довговічність [4].

Раніше [5-9] нами були запропоновані склади електролітів та режими електролізу для осадження металоксидних покриттів, визначено умови гальваноостатичного електролізу, що дозволяє вести формування хромвмісних покриттів модифікованих різними сполуками таких металів як, молибден, титан, алюміній, цирконій тощо. Результати випробувань продемонстрували, що модифікація покриттів збільшує протикорозійні, електроізоляційні властивості. Подальший розвиток цього підходу може бути реалізовано з використанням імпульсних режимів електролізу, тому розробка стратегії режиму осадження в нестационарних умовах є безперечною актуальністю.

Процес формування зародків цільового продукту електрохімічного покриття залежить від умов [11-13]. Це дає можливість одержання зародків різної форми та розміру у програмованих режимах електролізу при варіюванні параметрів. Так, зокрема, в цій роботі формування оксидних покриттів проводили з використанням гальваностатичних імпульсів, що чергуються з паузами.

Багато деталей, що впливають на якість і властивості покриттів, що формуються, все ще не ясні, особливо це стосується процесу формування катодного металоксидного шару. Дослідження в цій області можуть відкрити нові можливості по формування покриттів із заданим набором функціональних властивостей. Дана робота вносить певний вклад до вирішення цих питань.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Змінюючи параметри процесу електролізу, склад і концентрацію компонентів електроліту, його температуру, густину струму, напруженість електричного поля, інтенсивність перемішування, коефіцієнт нестационарності режимів електролізу, послідовність нанесення осадів, можна отримати покриття найрізноманітніших властивостей і структури [2, 10-14].

Автори показали [11] спосіб оксидування нержавіючої сталі в електроліті, який містить хромовий ангідрид та сульфатну кислоту, при густині струму 10-100 А/дм², температурі 45-75°C. Електроліт дозволяє одержувати захисні

оксидні покриття на металах та сплавах із низьким виходом за струмом, який у залежності від концентрації компонентів електроліту та режимів електролізу знаходиться у межах 10-16%.

В роботі [12] для оксидування нержавіючої сталі передбачали нанесення оксидних покриттів на сталь 08X18H10 методом електрохімічного оксидування в електроліті, який містить, г/л: H_2SO_4 400, $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 7,5, густині струму 0,06 А/дм², тривалістю імпульсу 2,5 с, тривалістю паузи 2,5 с впродовж 0,3 – 1 годин. Електроліз проводили при температурі 70-90 °С, що використовували задля інтенсифікації процесу.

Згідно [15-17] формування плівки золотим кольором із електроліту складу, моль/л: CrO_3 2,5, H_2SO_4 5,0, здійснювали методом змінного імпульсного струму прямокутної хвилі із наступними параметрами: $j = 0,01$ А/дм², $t = 18-25$ °С, $\tau = 60$ хв., $j_{\min} = -0,81$ мА/см² [16], $j_{\max} = 2$ мА/см² [18], протягом 15 хв. Підвищення температури від 25 до 75°C провокує зменшення часу процесу формування, який впливає на розташування шарів у міру зростання плівки. При найнижчій температурі (25°C) оксидна плівка росте повільніше і є більш якісною ніж плівки, вирощені при більш високих температурах. Це підтверджується найменшим значенням шорсткості для отриманих КОП при 25°C [16]. Відхилення від оптимальних режимів формування оксидних шарів, які встановлені вченими [16] призводить до утворення дуже тонких плівок або слабо зчеплених з основою покриттів. До того ще в процесі роботи у ванні накопичуються сполуки заліза (VI) FeO_4^{2-} , які істотно впливають на кінетику утворення пористих оксидів. Ці сполуки термодинамічно нестійкі та розпадаються на кисень та сполуки Fe (III), таким чином, умови оксидування змінюються при тривалій зупинці в роботі ванни або, навпаки при її інтенсивній експлуатації. Встановлено, що отримані плівки майже виключно складаються із магнетиту Fe_3O_4 [16-18].

Оксидні покриття чорного кольору на сталі 12X18H10Т можливо отримати катодною обробкою зразків у розчинах хромового ангідриду із додаванням солей інших металів, наприклад із електроліту [19, 20]. Додавання до електроліту деяких компонентів впливає на процес отримання якісних оксидних покриттів: $(\text{NH}_4)\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ підвищує зносостійкість плівки, ZnSO_4 стабілізує потенціал фарбування та MnSO_4 прискорює процес забарвлення. Цей процес є одноетапним та покриття, отримані за допомогою цього методу, не мають пор. Тому одним із важливішим показником

поверхні синтезованих електрохімічними методами покриттів є його морфологія та структура, які впливають на їх прикладні властивості, такі як, захисні, електроізоляційні, зносостійкість тощо.

Постановка завдання. Метою роботи є дослідження впливу параметрів імпульсного уніполярного електролізу на морфологію поверхні хромоксидних покриттів на сталі 08X18H10.

Виклад основного матеріалу. Електрохімічне осадження оксидних покриттів проводили при температурі 18-25°C в розчинах наступного складу, г/л: CrO₃ 150-250, H₃BO₃ 15-20, NaNO₃ 4-5, Ba(OH)₂ 1-2. Застосовували скляний герметичний триелектродний осередок; допоміжним електродом була платинова сітка, а робочим – сталь марки 08X18H10 із площею 0,8 см², електрод порівняння – хлоридсрібний. Поляризацію робочого електрода здійснювали від потенціостата IPC-Pro. Параметри режиму імпульсного електролізу наведені в табл. 1.

Дослідження морфології отриманих покриттів проводили за допомогою металографічного мікроскопу Leica DM ILM з цифровою відеокамерою Leica DFC 295.

У режимі імпульс/пауза результат залежить від співвідношення величин струму імпульсу, тривалості імпульсу, зворотного імпульсу і паузи. Варіювання параметрів електролізу в уніполярному режимі – імпульс/пауза показало, що при амплітуді прямого імпульсу $j_i = 20$ А/дм², тривалістю $\tau_i = 1$ с (табл. 1, режим № 1) на електроді утворюється темний однорідний осад на нержавіючій сталі.

Збільшення тривалості паузи τ_n веде до зростання скважності, що вдвічі знижує кількість центрів кристалізації, проте при зростанні імпульсу j_i до 40 А/дм² та кількості електрики на 30% (табл. 1, режим № 2) нівелює зміну величини скважності, але суттєво не впливає на формування покриття. Таким чином, збільшення тривалості паузи τ_n від 0,25 до 0,5 с,

тобто зростання скважності призводить до зменшення кількості центрів кристалізації на сталі.

Використання в програмі зворотного імпульсу амплітудою до $j_i = 10$ А/дм² призводить до формування несучільного покриття. Збільшення тривалості зворотного імпульсу у такому ж часовому інтервалі, коли $\tau_i \geq 1$ с, веде до незначного зростання кількості центрів кристалізації, очевидно, вплив зворотного імпульсу у разі схоже з дією паузи, тобто, сприяє вирівнюванню концентрації компонентів у приелектродному шарі. Якщо ж $\tau_i \leq 1$ с, то збільшення тривалості зворотного імпульсу знижує кількість центрів кристалізації, тобто, у таких умовах у зворотному імпульсі відбувається розчинення значної кількості зародків. Таким чином, варіювання значень параметрів імпульсного електролізу не дозволило досягти збільшення числа центрів кристалізації при формуванні оксидного хромвмісного покриття.

При незмінній кількості електрики та величини скважності поляризації імпульсним струмом амплітудою $j_i = 80$ А/дм² тривалістю 2 с та паузи 1 с (табл. 1, режим № 3) електролізу протягом години у таких умовах дозволяє отримати більш суцільне покриття. Такий результат, як показано на рис. 1, пов'язаний з досягненням потенціалу відновлення електрохімічних та хімічних іонів на основі хрому (VI).

Зниження амплітуди імпульсів до $j_i = 20$ А/дм² при незмінному значенні тривалості паузи, яка дорівнює тривалості імпульсу $\tau_i = \tau_n = 0,5$ с (табл. 1, режим № 4) призводить до незначної поляризації електрода, що веде до утворення несучільного хромоксидного покриття.

В табл. 2 представлена еволюція морфології поверхні оксидного покриття на сталі при зростанні скважності імпульсного електролізу. Видно, що зменшення значення скважності імпульсного електролізу призводить до формування більш суцільного оксидного покриття. При більш

Таблиця 1

Режим імпульсного електролізу для осадження хромоксидного покриття

| Параметри режиму | № 1 | № 2 | № 3 | № 4 |
|--|--------|-------|-------|---------|
| Співвідношення тривалості імпульсу струму та паузи τ_i/τ_n , с/с | 1/0,25 | 1/0,5 | 2/1 | 0,5/0,5 |
| Скважність | 1,12 | 1,5 | 1,5 | 2 |
| Амплітуда густини струму j_i , А/дм ² | 20 | 40 | 80 | 20 |
| Кількість електрики $(I \cdot \tau)$, А·ч | 0,02 | 0,03 | 0,025 | 0,025 |

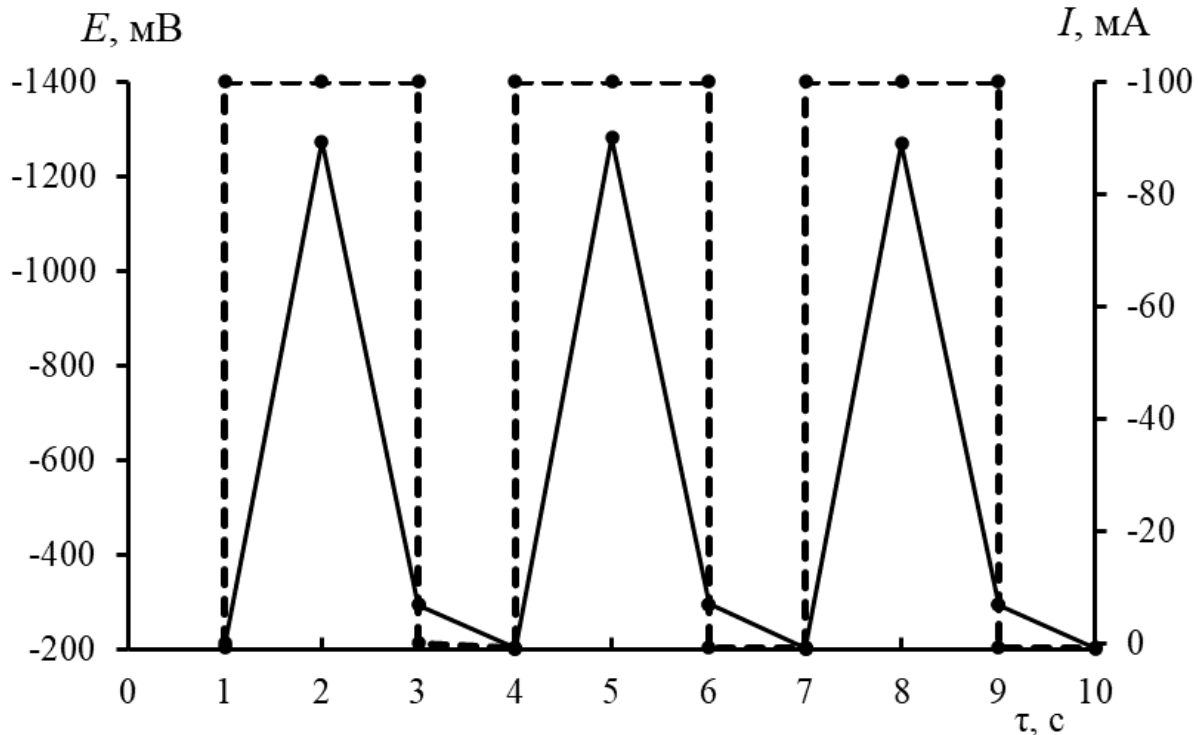


Рис. 1. Зміна поляризації (безперервна крива) при накладенні імпульсного струму (пунктирна крива) на сталі 08X18H10. Режим № 3



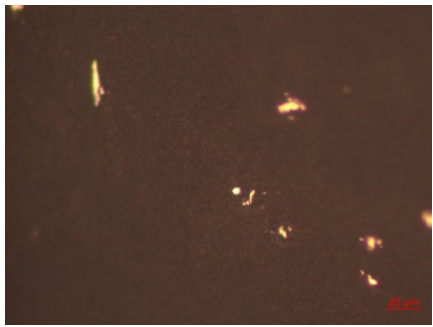
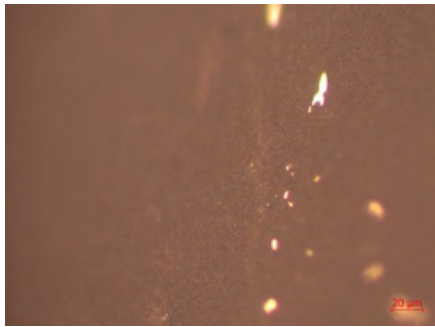
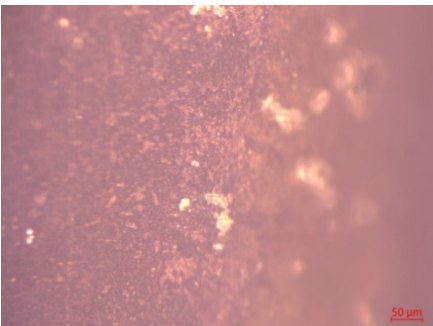
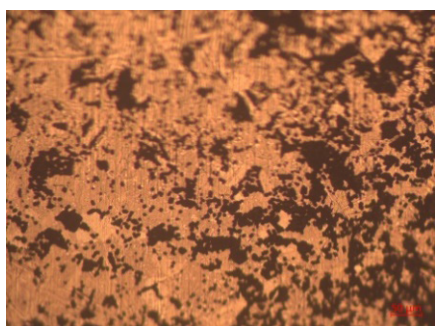
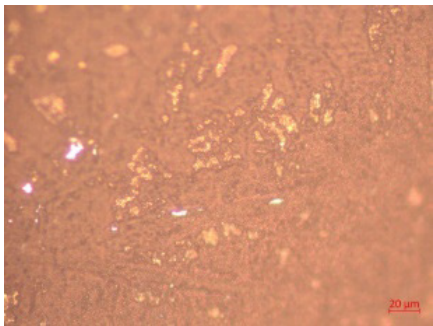
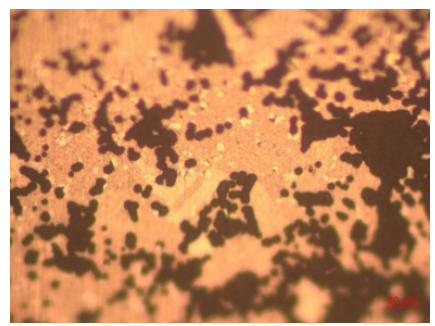
уважному розгляді локальної морфології (x500) цікаво відмітити, що покриття має глобулярну текстуру (режим № 4), а формування покриття має острівковий механізм, що як сказано вище, пов'язано із зменшенням центрів кристалізації. При зменшенні скважності поверхня покриття стає більш рівномірною, розмір глобул зменшується, а границі між ними нечіткі. Збільшення кількості електрики у двічі в режимі № 1 показує майже однорідну морфологію поверхні. Збільшення тривалості імпульсу, скважності та імпульсу струму не покращує результат. Таким чином можна зробити висновок, що величина скважності імпульсного електролізу має домінуючий фактор у порівнянні з іншими електрохімічними параметрами.

Чітка кореляція між центрами кристалізації та скважністю по-перше пов'язана з кінетикою формування оксидів на яку треба певний час. Відомо, що в умовах імпульсного електролізу металевих покриттів, частіше спостерігається зв'язок між частотою та амплітудою імпульсу. Оскільки

остання величина обумовлює величину поляризації, що напряму впливає на кількість центрів зародків, але для процесу формування оксиду із іонів металу, за своїм ще й складним механізмом, потребує певний час, та можна затверджувати що ці реакції є лімітуючими. Як бачимо зміна концентрації учасників цього процесу, яку регулюють густиною струму, веде до перебігання інших нецільових реакцій, що в свою чергу призводить до формування несучільного покриття.

Висновки. Таким чином, експериментальні дані, отримані в процесі осадження хромоксидного покриття імпульсним електролізом, свідчать про доцільність використання розглянутих режимів. Останні, як було встановлено, дозволяють керувати процесом формування: кількістю центрів зародків металоксидів їхнім розміром та швидкістю зростання. Представлені результати свідчать про те, що зменшення значення скважності імпульсного електролізу призводить до осадження однорідного оксидного покриття на сталі 08X18H10.

Мікрофотографії поверхні сталі 08X18H10 після імпульсного електролізу за різних умов режиму

| Масштаб | Номер режиму | |
|---------|---|--|
| | № 1 | № 2 |
| x200 |  |  |
| x500 |  |  |
| | № 3 | № 4 |
| x200 |  |  |
| x500 |  |  |

Список літератури:

1. Shtefan V., Kanunnikova N., Pilipenko A., Pancheva H. Corrosion Behavior of AISI 304 Steel in Acid Solutions. *Materials Today: Proceedings*. 2019. Vol. 6, №. P 2. P. 149-156.
2. Shtefan V. and etc. Influence of chloride on the anode dissolution of aisi 304 steel / V. Shtefan and etc. *Science, research, development. Technics and technology: monografia pokonferencyjna*, 29.11. 30.11.2018, Rotterdam. – Warszawa: Diamond trading tour, 2018. № 11. P. 62–64.
3. Shtefan V., Kanunnikova N., Balamut N. Anodic oxidation of AISI 304 steel in acidic solutions. *Proceedings of Odessa Polytechnic University*. 2018. Vol. 56, № 3. P. 89–94.

4. Shtefan V.V., Kanunnikova N.A., Leshchenko S.A. et al. Anodic dissolution of stainless steel in acid solutions. *Записки Таврійського національного університету ім. В.І. Вернадського*. 2019. Т. 30(69). № 2. Ч. 2. С. 136-141.
5. Shtefan V.V., Kanunnikova N.O., Goncharenko T.Ye. Analysis of the structure and anticorrosion properties of oxide coatings on aisi 304 steel. *Materials Science*. 2021. Vol. 57. P. 248-255.
6. Пат. на винахід № 119022 Україна, МПК С25D 11/34. Спосіб електрохімічного оксидування нержавіючої сталі / Штефан В.В., Кануннікова Н.О., Баламут Н.С., Кобзев О.В.; заявник та власник патенту НТУ "ХПІ". № а201807699; заявл. 09.07.2018; опубл. 10.04.2019, бюл. № 7.
7. Shtefan, V.V., Kanunnikova, N.A. Oxidation of AISI 304 Steel in Al- and Ti-Containing Solutions. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*. 2020. Vol. 56. P. 379-384.
8. Пат. на кор. мод. № 137165 Україна, МПК С25D 11/38. Електроліт для формування ізоляційних покриттів на нержавіючій сталі / Штефан В.В., Кануннікова Н.О., Бофанова М.В.; заявник та власник патенту НТУ "ХПІ". – № u201902705; заявл. 20.03.2019; опубл. 10.10.2019, бюл. № 19.
9. Пат. на кор. мод. № 147835 Україна, МПК С25D 11/34. Спосіб формування захисних оксидних покриттів на нержавіючій сталі / Штефан В.В., Смирнова О.Ю., Кануннікова Н.О. Баламут Н.С.; заявник та власник патенту НТУ "ХПІ". – № u202008156; заявл. 21.12.2020; опубл. 16.06.2021, бюл. № 24.
10. Костин Н.А. Влияние частоты импульсного тока на скорость осаждения, структуру и некоторые свойства осадков. *Электрохимия*. 1985. Т.21, вып.4. С. 444-449.
11. Кунтий О.І. Електрохімія та морфологія дисперсних металів. Львів: Видавництво НУ «Львівська політехніка», 2008. 208 с.
12. Кунтий О., Яцишин М., Зозуля Г., Добровецька О., Решетняк О. Електрохімічний синтез металевих наночастинок і нанокompatитів : монографія.-Львів: Видавництво НУ «Львівська політехніка», 2019. 228 с.
13. Черкез М.Б. Хромирование. 3-е изд., перераб. и доп. - Л.: Машиностроение. 1971. 112 с.
14. Защитные покрытия : учеб. пособие / М. Л. Лобанов, Н. И. Кардонина, Н. Г. Россина, А. С. Юровских. Екатеринбург, Изд-во Урал. ун-та, 2014. 200 с.
15. Rosa Junqueira M.R., Margareth Andrade S., Célia Loureiro R.O. et al. Mechanical properties of interference thin films on colored stainless steel evaluated by depth-sensing nanoindentation. *Surface & Coatings Technology*. 2006. Vol. 201. P. 2431–2437.
16. Junqueira R.M.R., de Andrade Manfridini A.P., de Oliveira Loureiro C.R. et al. Morphological, chemical and mechanical characteristics of an anodic coating on stainless steel. *Surface Engineering*. 2013. Vol.29, 5. P. 379–383.
17. Rosa Junqueira M.R., Célia Loureiro R.O., Margareth Andrade S. et al. The chemical and mechanical characteristics of thermally aged interference thin films on stainless steel. *Surface & Coatings Technology*. 2009. Vol. 203. P. 1908–1912.
18. Husain E., Nazeer A.A., Alsarraf J. et al. Corrosion behavior of AISI 316 stainless steel coated with modified fluoropolymer in marine condition. *Journal of Coatings Technology and Research*. 2018.
19. Мирзоев Р.А., Давыдов А.Д. Анодные процессы электрохимической и химической обработки металлов. Санкт-Петербург, Изд-во Политехнического университета, 2013. 382 с.
20. Betova I., Vojinovic M., Laitinen T. et al. The transpassive dissolution mechanism of highly alloyed stainless steels: I. Experimental results and modelling procedure. *Corrosion Science*. 2002. Vol. 44,12. P. 2675–2697.

Shtefan V.V., Balamut N.S., Kanunnikova N.O., Kobziev O.V. PULSE ELECTROLYSIS OF CHROMOXIDE COATING ON STAINLESS STEEL

Metal oxide materials are often used for various purposes in military equipment, which give interesting results, especially due to their strength, corrosion resistance, low specific gravity and other properties. The most common use of oxide coatings is, for example, the manufacture of automatic small arms. The main areas of application of metal oxide coatings are mechanical engineering, chemical, petrochemical, automotive, metallurgical industries, medicine, electronics, construction and more. The range of applications of these materials is increasing day by day and it is safe to say that these are the materials of the future.

Stainless steel is used in all areas of human activity, from heavy engineering to electronics and mechanics. The study of the laws of kinetics of the formation of metal oxide coatings on steel is important because they are of practical importance in technologies such as surface treatment of materials and electrochemical protection of metals and alloys from corrosion. The lack of reliable information on the kinetics and mechanisms of the formation of metal oxide coatings on high-alloy stainless steels is relevant, as they should be the basis for predicting the properties of coatings and the development of corrosion protection. Such studies are especially important for electrochemical processes in which the composition of the reaction masses during the formation of the material changes and, accordingly, changes its properties. Pulse conditions of electrolysis

help to understand the factors influencing the process regime on the process of metal oxide surface formation. The paper shows the influence of non-stationary electrolysis parameters, such as amplitude, borehole, pulse duration and pause, the presence of the reverse pulse on the structure and texture of the surface of chromium-containing coatings. It has been experimentally proven that the amount of borehole has a dominant effect on the deposition of a solid cathode layer. Studies of morphology have shown that the texture of the sediment is formed in the form of globules, the size of which depends on the parameters of the pulse electrolysis regime.

Key words: *steel, chromoxide coating, morphology, pulse electrolysis.*

ТРАНСПОРТ

УДК 656.61.052

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.3/16>

Мельник О.М.

Одеський національний морський університет

Волянська Я.Б.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Калініченко Є.В.

Одеський національний морський університет

Логінов О.В.

Одеський національний морський університет

Корякін К.С.

Одеський національний морський університет

Бурлаченко Д.А.

Одеський національний морський університет

Щенявський Г.С.

Одеський національний морський університет

ВИКОРИСТАННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ НА ВОДНОМУ ТРАНСПОРТІ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЇХ РОЗВИТКУ

Інформаційні технології дозволяють управляти величезними потоками інформації. Такі технології здатні обробляти інформацію, зберігати практично будь-які її обсяги, передавати дані в короткі терміни на будь-якій відстані та відображати результати обробки цих даних у тому виді, який полегшує та покращує розуміння отримуваної інформації, що в свою чергу має за мету допомогу у прийнятті рішень в складних умовах. Нестримно зростаючий потенціал інформаційних технологій забезпечує скорочення витрат у виробничій сфері, сприяє полегшенню і поліпшенню рівня життя, відкриває нові можливості для людей. Зростаючу роль застосування інформаційних технологій у міжнародному судноплаванні, і зокрема у процесі судноводіння, важко переоцінити. Їх використання дозволяє значно підвищити ефективність і безпеку експлуатації суден, одночасно знижуючи навантаження на судноводіїв, особливо в складних умовах плавання. Слід зазначити, що аварії внаслідок помилок або неправильних дій в процесі судноводіння, продовжують мати місце, незважаючи на розвиток і доступність сучасних судових і берегових систем контролю руху суден, призначених для поліпшення розуміння ситуацій і якості рішень, що приймаються. Тому з урахуванням недостатнього рівня безпеки судноводіння, та з метою його подальшого підвищення, акцентується необхідність у впровадженні нових інформаційних технологій, зокрема, розвиток електронної навігації. Вона є концепцією, що отримала розвиток під егідою ІМО для підтримки і поліпшення процесу ухвалення рішень, через управління інформацією, що впливає на надійність, безпеку та ефективність морських комерційних перевезень за рахунок досконалішої організації опрацювання даних як на судах, так і на березі, шляхом забезпечення ефективного обміну інформацією між суднами та між судном і берегом.

Ключові слова: безпека судноплавання, інформаційні технології, судові технічні засоби.

Постановка проблеми. Морський та внутрішній водний транспорт, дедалі більше входить до сфери інтересів провідних світових компаній, постачальників сучасних інформаційних технологій. Вартісне обладнання, що було засноване

переважно на супутниковому зв'язку задля онлайн передачі і обміну великими обсягами даних, поряд з використанням на сучасних судах, отримує поширене застосування у морських портах та інших інфраструктурних елементах водного

транспорту, що забезпечують безпеку судноплавства, та є обов'язковими умовами функціонування сучасного судноплавного бізнесу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останніми роками, найбільш перспективними напрямками застосування інформаційних технологій у сфері торговельного мореплавства стала електронна навігація та безпека судноводіння. Саме ці аспекти стали ключовими ініціативами Міжнародної морської організації (ІМО) [8]. Питанням впровадження концепції е-Навігації присвячені праці численних вчених, так у роботах [1, 2] розглядаються складові елементи самої концепції та її зв'язок з людським чинником. Праці [9, 11, 15] присвячені дослідженню основних аспектів морської електронної навігації. Питання щодо необхідності оновлення навчальної програми щодо класичної навігації у зв'язку з прийняттям моделі е-Навігації розглянуто у [5]. Використання сучасних технологій у судноводінні, сучасний стан та аналіз перспектив реалізації технології е-Навігації [3, 4, 6, 7]. Вивчення перспективи технологічного розвитку і впровадження концепції безпека судноводіння у [12-14]. Проблеми безпеки експлуатації морського транспорту, аналіз ступеня ситуаційної поінформованості серед членів екіпажів суден, використання сучасної методики оцінки рівню безпеки судна та шляхи його підвищення розглянуто у [10, 16-18].

Виклад основного матеріалу. Електронна навігація являє собою форму навігації, що використовується морськими суднами та наземними об'єктами, була розроблена Міжнародною Морською Організацією (ІМО), в основі якої лежить координація дій в процесі обміну, подання та аналізу інформації на судах та в берегових службах за допомогою електронних технологій для підвищення рівня безпеки судноплавства між системами морської навігації та допоміжних берегових служб. В даний час прийнято таке визначення е-Навігації як скоординований збір, інтеграція, передача, відтворення та аналіз інформації про ситуацію на борту суден та на березі за допомогою електронних засобів, з метою забезпечення

навігаційного переходу "від причалу до причалу" та роботи відповідних берегових служб щодо підвищення надійності та безпеки морської навігації. Додатково, це гармонізовані заходи, що спрямовані на підвищення рівня безпеки судноплавства за допомогою електронних засобів, що працюють на вдосконалення безпеки мореплавства та підвищення ефективності роботи пов'язаних з ним служб, які задіяні у забезпеченні безпеки та охорони на морі та захисті морського навколишнього середовища. Очікується, що в результаті впровадження концепції е-Навігації з'являться принаймні три базових компонента, які в даний час використовуються як основа для визначення потреб користувачів, а саме: суднові системи, берегові системи та інфраструктура зв'язку а також отримає подальший розвиток розроблення навігаційних системи на основі об'єднання їх в єдині комплекси, що являють собою сукупність бортових датчиків для забезпечення обміну інформацією у стандартному інтерфейсі між користувачами та єдиною системою управління. Базовими елементами такої системи є електронні засоби позиціонування судна з високим рівнем інтеграції (електронне позиціонування), електронні навігаційні картки (ENC) та аналітична функція, що мінімізує вплив людського фактору та дозволяє знизити навантаження на моряків. До того ж буде вдосконалена система управління рухом суден та роботою відповідних берегових служб за рахунок використання доопрацьованих схем підтримки та координації комплексних даних, а також обміну ними у форматах, які будуть найбільш зручними та зрозумілими для операторів берегових служб, що забезпечують безпеку та ефективність руху морських суден. Інфраструктура, що забезпечує пряму авторизовану передачу інформації на борту судна, між судном та берегом, а також між береговими службами та іншими сторонами, з усіма супутніми перевагами, включаючи мінімізацію ймовірності впливу людського фактору.

Концепція ІМО "е-Навігація" може розглядатися як аналог багатьох відомих назв, зі спеціальним



Рис. 1. Передумови впровадження е-Навігації

визначенням префіксу "е", була запропонована на розгляд у 2006 році державами – членами ІМО для координації, збору, інтеграції, передачі та подання інформації про ситуацію на морі. Тому "е" може означати як "з розширеними можливостями" (англ. enhanced), так і "електронний" (англ. electronic), проте ці значення не обмежують функціональні можливості електронної навігації. Необхідно відзначити, що існують різні види морської навігації за допомогою електронних приладів, і їх не можна плутати з запропонованою ІМО концепцією.

Цілком очевидно, що як судна так і берегові служби, що відповідають за безпеку судноплавства, повинні бути забезпечені сучасними та надійними засобами, використання яких дозволить зробити морське судноплавство та системи зв'язку більш надійними та зручними, та призведе до скорочення кількості помилок з боку судноводіїв та операторів. Однак якщо подальший розвиток технологій не буде належним чином скординований і узгоджений, існує небезпека того, що в майбутньому розробка морських навігаційних систем буде ускладнена відсутністю єдиних стандартів взаємодії бортових та берегових систем, несумісністю бортового обладнання суден та необґрунтовано високим рівнем складності технічних приладів.

Стратегія, що спрямована на підвищення рівня безпеки судноплавства, має за мету скорочення кількості людських помилок за рахунок викорис-

тання електронної навігації, що в свою чергу забезпечить розвиток інтелектуального рівня морського транспорту. Аналіз проектів електронної навігації, дозволяє зрозуміти, що вона створює нову парадигму обміну морською інформацією і формує цифрову інфраструктуру для судноплавства.

Починаючи з 2005 року, деякі країни, зокрема Японія, Нідерланди, Сінгапур передали на розгляд до Комітету з безпеки судноплавства ІМО (MSC – Maritime Safety Committee) доповідь з розробки стратегії е-Навігації, де було запропоновано додати пункт по е-Навігації в робочі програми підкомітетів NAV та COMSAR. Крім цього, у документі йшлося про те, що головним завданням концепції є вироблення стратегічного підходу до комплексного використання як існуючих, так і нових навігаційних засобів, зокрема, електронних засобів. Як стверджувалося в документі, це дозволило б зменшити кількість нещасних випадків, помилок та аварій шляхом розробки стандартів та побудови точної та економічно ефективної системи, що відповідає програмі ІМО з безпеки та ефективності судноплавства, а також охорони навколишнього середовища. У доповіді MSC наголошувалося, що обидва підкомітети повинні розглянути ці питання та розробити стратегічний підхід в рамках відповідних робочих програм. На наступній конференції МАМС (Міжнародна Асоціація маячних служб, IALA), було наголошено наближення до вирішального етапу розробки того, що позначається загальним терміном "е-Навігація".



Рис. 2. Мета е-Навігації

За умови готовності більшості базових компонентів, в початковому стані залишалася розробка глобального стратегічного підходу, який мав би забезпечити комплексне об'єднання навігаційних засобів нового покоління, що використовувались на той час, або будуть введені в експлуатацію найближчим часом, іншими словами, створення єдиної комплексної системи. За умови втілення цих можливостей, представлявся шанс не тільки підвищити рівень морської безпеки та досягнути попередження нещасних випадків, але й одночасно значно покращити експлуатаційну ефективність використання морського транспорту з усіма економічними перевагами, що випливають. Також було підкреслено, що не існує сумнівів в необхідності забезпечення екіпажів суден та інших служб, що відповідають за безпеку судноплавства, новітніми засобами, що роблять судноплавство та морський зв'язок, надійнішими, і, таким чином, зменшують ймовірність виникнення помилок з боку людського елемента, особливо тих, що призводять до загибелі людей, пошкоджень, екологічних та економічних збитків. Тому основною метою е-Навігації є підвищення рівня безпеки на морі, що в свою чергу дозволяє забезпечити додаткові переваги державам, власникам суден та морякам у протидії виникненню аварійних ситуацій.

Далі було внесено питання щодо розвитку концепції е-Навігація до робочої програми NAV 52, де почалося його попереднє обговорення. Основним підсумком етапу проведених обговорень було ухвалення рішення про започаткування Координаційної групи ІМО (Correspondence Group) під керівництвом Великобританії, попри існування безлічі національних та міжнародних груп та організацій, що брали участь у роботі Координаційної групи ІМО з е-Навігації. Однією з них, був міжнародний Комітет з е-Навігації МАМС (Міжнародна асоціація маячних служб), який був сформований під час роботи конференції. З боку МАМС було також розроблено для Комітету з е-Навігації програму роботи. Цей спеціально створений у рамках МАМС комітет, що складається з представників, спеціалістів та технічних експертів різних країн, що мав надавати експертну оцінку в галузі засобів забезпечення навігації та служб управління рухом суден (VTS), для сприяння розробці концепції е-навігації на базі ІМО.

Основні цілі концепції е-Навігації, що було визначено повинні:

– підтримувати безпечний рух суден, враховуючи гідрографічну, метеорологічну та навігаційну інформацію та ризики;

– підтримувати, по можливості, контроль та управління рухом суден за допомогою берегових служб;

– підтримувати систему зв'язку, включаючи передачу інформації між суднами, кораблем та берегом, між береговими службами та іншими користувачами;

– забезпечувати можливість підвищення ефективності перевезень та логістики;

– підтримувати високий рівень реагування на аварійні ситуації, а також роботи пошукових та рятувальних служб;

– демонструвати певний рівень точності, цілісності та безперервності інформації, що відповідає особливим вимогами щодо безпеки;

– об'єднувати та відтворювати інформацію бортових та берегових систем за допомогою інтерфейсу оператора, що дозволить максимально підвищити рівень безпеки судноплавства та мінімізувати ризик виникнення неправильного тлумачення інформації користувачами;

– об'єднувати та відтворювати інформацію бортових та берегових систем для управління робочим навантаженням користувачів, а також забезпечувати роботу користувача та процес прийняття рішень;

– вводити вимоги щодо навчання та освоєння, що пред'являються користувачам, на всьому протязі процесу розробки та реалізації;

– підтримувати глобальне покриття, узгоджені стандарти та заходи, а також сумісність та здатність до взаємодії обладнання, систем, символіки/позначень та експлуатаційних методик з тим, щоб запобігти можливості виникнення конфлікту між користувачами;

– забезпечувати можливість нарощування функцій та бути доступною для всіх потенційних морських користувачів.

Підкомітет NAV 53 розглянувши пропозиції Координаційної групи щодо вимог користувачів для подальшого формування та визначення вимог, включаючи розробку стандартного режиму для морських користувачів, зазначив, що система е-Навігації має скоротити кількість деяких помилок, що допускаються при аналізі та передачі інформації, а також при прийнятті рішень бортовими та береговими службами. Члени підкомітету погодилися з тим, що стратегія е-навігації має бути не технічно орієнтованою, а розроблятися загалом відповідно до вимог користувачів. Тому підкомітет був повідомлений про те, що МАМС та МФАМК (Міжнародна Федерація Асоціацій Морських Капітанів, IFSMA) працюють над ство-

ренням методики визначення користувачів та їх потреб та будуть представляти відповідну інформацію до Координаційної групи. Таким чином, члени підкомітету висловили свою згоду на те, щоб Координаційна група продовжила роботу з визначення користувачів та їх потреб. На закінчення, підкомітет NAV 53, доручив Координаційній групі встановити всіх потенційних користувачів е-Навігації; визначити вимоги користувачів до е-Навігації; розглянути необхідність проведення консультацій з іншими організаціями та зацікавленими особами, такими як фахівці у галузі навігації, служби підтримки, науково-дослідні організації, виробники обладнання та адміністрації портів; продовжити опрацювання інших аспектів стратегічного підходу до е-Навігації.

Тобто е-Навігація – це комплексна довгострокова концепція, яка поєднує різні зацікавлені сторони і загалом впливає на морське судноплавство. До переліку користувачів можна додати моряків, лоцманів, виробників обладнання, служби управління рухом суден, прибережні держави, держави порту і держави прапора, гідрографічні організації, власників суден, операторів суден та фрахтувальників. Надалі, розвиток концепції е-навігації вимагатиме доопрацювання методик щодо підготовки персоналу, навчання та експлуатації.

Концепція е-навігації передбачає поліпшення та нарощування традиційних засобів навігації шляхом інтеграції можливостей людини та машини що є чудовим інструментом для здійснення безперервного контролю при виконанні стандартних операцій, таких як порівняння різних джерел вхідних даних тобто завдання, яке людина не може вирішити настільки швидко і тому вважає надто трудомісткою. Перевага людей полягає

в тому, що вони мають інтуїтивне знання і можуть займатися абстрактними проблемами, наприклад, технічним обслуговуванням судна та управління ресурсами. Але з приходом електронних навігаційних засобів, таких як електронні карти та системи позиціонування, роль спеціаліста на судні змінилася, проте морська спільнота виявилася не до кінця підготовленою до прийняття таких змін. У такій ситуації знаходяться і представники берегових служб. Одним із завдань е-Навігації залишається перегляд існуючого підходу для того, щоб моряки та оператори берегових служб брали участь у процесі навігації, а не лише контролювали його. Це дозволяє морякам та операторам берегових служб підвищити рівень прийняття рішень та використовувати для цього надійні електронні технології та системи управління інформацією, що скорочують число факторів, що відволікають увагу.

Запровадження концепції е-Навігації також підвищує рівень безпеки морського судноплавства за рахунок зниження числа факторів ризику, що сприятиме запобіганню забруднення навколишнього середовища (у випадку зіткнення суден або при їх посадці на міліну). Також додатково проводяться дослідження, які повинні визначити, чи допоможе е-Навігація бути корисною у заходах спрямованих на підвищення енергоефективності флоту та скоротити обсяги викидів вуглецю, сірки та азоту за допомогою вибору більш ефективного алгоритму прокладання маршруту переходу судна та його обслуговування протягом рейсу, а також наскільки можна використовувати е-Навігацію у якості фінансового інструменту для розрахунку позовів про компенсацію збитків та торгівлі квотами на викиди. Наприклад, якщо на судні



Рис. 3. Алгоритмічна схема організації обміну інформаційними даними

встановлено повністю інтегровану систему відображення електронних карт та інформації (ЕКНІС), це не означає, що судно вже обладнане системою е-Навігації, проте система відображення електронних карт та інформації має стати одним із базових елементів е-Навігації. З приводу того наскільки діяльність ІМО в галузі ЕКНІС, НІС а також діяльність МАМС щодо забезпечення служб управління рухом суден відповідає концепції е-Навігації то слід підкреслити що системи та технології, що розробляються та використовуються в рамках ЕКНІС, ІНС (Інтеграційні навігаційні системи, INS) та ІСХМ (Інтегровані системи ходового містка, IBS), є базовими елементами комплексної стратегії е-Навігації, призначеної для координації збору, інтеграції, передачі та відтворення інформації про ситуацію на морі, на борту суден та на березі.

Висновки. У процесі впровадження електронної навігації передбачалося її застосування у поєднанні з відповідними методиками, тому за необхідне є внесення змін до процесу навчання

користувачів, включаючи як берегові служби, так і судові. Така концепція без винятку отримує поширення на судна всіх типів та розмірів, що призначені для перевезень вантажів або виконання пасажирських перевезень, додатково системи е-навігації можуть бути встановлені також на судах невеликого тоннажу, підкреслюючи те що вона дозволяє, в цілому, підвищити рівень безпеки водного транспорту. Вочевидь що в такі стандарти безпеки в рамках концепції е-Навігації є обов'язковими для всіх торговельних суден, які повинні дотримуватися зазначених вимог при заході в порт чи територіальні води держави попередньо запроваджуючи гармонізований збір, інтеграцію, обмін, обробку та аналіз інформації на як на борту судна так і в берегових системах. Також за допомогою електронних засобів та технологій очікується подальше вдосконалення моніторингу процесу навігаційного переходу судна, судових операцій в портах призначення та інших відповідних сервісів, що забезпечують безпеку мореплавання та захист навколишнього середовища.

Список літератури:

1. Patraiko D. (2007) The Development of e-Navigation. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, Vol. 1, No. 3, pp. 257-260.
2. Patraiko D., Wake P., Weintrit A. (2010) e-Navigation and the Human Element. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, Vol. 4, No. 1, pp. 11-16.
3. Вагущенко Л.Л. Современные информационные технологии в судовождении [Электронное учебное пособие] / Л.Л.Вагущенко – Одесса– ОНМА. – 2013. – 135 с.
4. Квасніков П.К. Концепція Е-навігації – навігації майбутнього. Сучасні підходи до високоефективного використання засобів транспорту. Колективна монографія /за ред. В. Чимшира / Ізмаїл : ДІ НУ «ОМА» 2020 – Київ: Міленіум, 2020. 472 с.
5. Jurdziński M. (2020) The Need to Update the Navigation Curriculum as a Consequence of Adoption the e-Navigation Model. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, Vol. 14, No. 3, doi:10.12716/1001.14.03.03, pp. 541-544.
6. Титов А. В. Состояние и перспективы реализации технологии е-навигации / А. В. Титов, Л. Баракат, А. Хаизаран // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. – 2019. – №4(56). – С. 621-630. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-621-630
7. Стратегія розвитку і впровадження е-Навігації. (Резолюція MSC 85/26/Add.1) e-Navigation strategy implementation plan.
8. Weintrit A., Wawruch R., Specht C., Gucma L., Pietrzykowski Z. (2007) Polish Approach to e-Navigation Concept. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, Vol. 1, No. 3, pp. 261-269.
9. Korcz, K. (2016) Communication systems for safety and security of ships, *Journal of KONES*, Vol. No. 1, pp. 153-160.
10. Melnyk, O., Bychkovsky, Y., Voloshyn, A. (2022) Maritime situational awareness as a key measure for safe ship operation. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*. 114, 91-101. ISSN: 0209-3324. DOI: <https://doi.org/10.20858/sjstst.2022.114.8>
11. Main Aspects of a Maritime E-Navigation Project. URL: https://www.researchgate.net/publication/336802337_Main_Aspects_of_a_Maritime_E-Navigation_Project (дата звернення 29.01.2022).
12. Титов А. В. Перспективи технологічного розвитку і впровадження безпекажних суден / А. В. Титов, Л. Баракат // *Морські інтелектуальні технології*. – 2018. – № 1-3(41). – С. 94-103.
13. Rodseth O. J. (2014) A system architecture for an unmanned ship / O. J. Rodseth, A. Tjora // *Proceedings of the 13th International Conference on Computer and IT Applications in the Maritime Industries (COMPIT)*.

14. Burmeister H. C. (2014) Autonomous unmanned merchant vessel and its contribution towards the e-Navigation implementation: The MUNIN perspective/ H. C. Burmeister, W. Bruhn, O. J. R0dseth, T. Porathe // *International Journal of e-Navigation and Maritime Economy*. Vol. 1. — pp. 1-13. DOI: 10.1016/j.enavi.2014.12.002.

15. Pillich B. Developing e-Navigation, the early stages / B. Pillich. – URL: <http://ushydro.thsoa.org/hy07/0901.pdf> (дата звернення: 26.06.2019).

16. Мельник О.М., Бичковський Ю.В. Сучасна методика оцінки рівню безпеки судна та шляхи його підвищення / О.М. Мельник, Ю.В. Бичковський // *Розвиток транспорту*. – 2021. – № 2 (9) – С. 37– 46. DOI:10.33082/td.2021.2-9.03.

17. Мельник О.М., Бичковський Ю.В. Врахування фактору стресу у системі забезпечення безпеки мореплавства / О.М. Мельник, Ю.В. Бичковський // *Вчені записки ТНУ ім Вернадського. Технічні науки*. – 2021. – 32(71) № 4– С. 260-264.

18. Onyshchenko, S., Shibaev, O., Melnyk, O. (2021) “Assessment of Potential Negative Impact of the System of Factors on the Ship’s Operational Condition During Transportation of Oversized and Heavy Cargoes”, *Transactions on Maritime Science*. Split, Croatia, 10(1). DOI: 10.7225/toms.v10.n01.009.

Melnyk O.M., Volianska Ya.B., Kalinichenko Ye.V., Lohinov O.V., Koryakin K.S., Burlachenko D.A., Shcheniavskiy G.S. INFORMATION TECHNOLOGY IMPLEMENTATION ON WATER TRANSPORT AND PROSPECTS FOR THEIR DEVELOPMENT

Information technologies allow managing large information flows. These technologies are capable to process information, storing practically any of its volumes, transferring data in short terms at any distance, and displaying the results of data handling in that form, which facilitates and enhances understanding of content, which in turn is intended to help in making decisions in difficult situations. The rapidly growing potential of information technology ensures cost reduction in the production sphere, contributes to the improvement of living standards and opens up new opportunities for people. The growing role of the use of information technology in the international shipping industry, especially in the process of vessel navigation, which is difficult to overestimate. Their use allows to significantly increasing the efficiency and safety of ship operation, at the same time reducing the pressure on the navigation personnel, especially in difficult sailing conditions. It should be noted that accidents as a result of errors or incorrect actions in the process of ship navigation, continue to occur, despite the development and availability of modern ship and shore systems designed to improve the understanding of situations and the quality of solutions that are taken. Therefore, given the insufficient level of shipboard safety, and in order to further improve it, the need for the implementation of new information technology, in particular, the development of e-navigation, is emphasized. It is a concept to support and improve decision-making through the management of maritime information, which has developed under the IMO policy of increasing reliability, safety and efficiency of maritime commercial shipping through a thorough organization of data processing on board the ship and on shore, and ensuring an effective exchange of information between the ships and the shore.

Key words: navigation safety, information technologies, shipboard technical equipment.

ЕЛЕКТРОНІКА

УДК 621.382

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.3/17>

Осадчук О.В.

Вінницький національний технічний університет

Осадчук В.С.

Вінницький національний технічний університет

Осадчук Я.О.

Вінницький національний технічний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ АВТОГЕНЕРАТОРНИХ ПАРАМЕТРИЧНИХ ОПТИЧНИХ СЕНСОРІВ

Запропоновано автогенераторні параметричні сенсори оптичного випромінювання на основі транзисторних мікроелектронних структур з від'ємним диференціальним опором з первинними фоточутливими елементами типу фоторезистора і фотодіода, причому первинні фоточутливі перетворювачі є активними елементами схем автогенераторів, що спрощує конструкцію сенсорів.

Виходячи з розгляду фізичних процесів у первинних фоточутливих елементах і автогенераторах, розроблено математичні моделі оптичних сенсорів, на основі яких отримано функції перетворення і чутливості. Показано, що основний внесок у зміну функції перетворення вносить зміна оптичної потужності. Це викликає зміну еквівалентної ємності і від'ємного диференціального опору коливальної системи автогенераторів сенсорів, що, у свою чергу, змінює вихідну частоту приладів. Чутливість оптичних сенсорів змінюється від 125,2 кГц/мкВт/см² до 134,8 кГц/мкВт/см² в діапазоні вимірюваної оптичної потужності від 0 мкВт/см² до 90 мкВт/см².

Отримані параметричні залежності функцій перетворення оптичних сенсорів показують можливість значно простіше отримувати основні характеристики сенсорів і наочно демонструють вплив кожного параметра первинних перетворювачів і елементів автогенераторів на вихідну частоту сенсорів у порівнянні з розрахунками функцій перетворення з еквівалентних схем пристроїв на основі рівнянь Кірхгофа. У фоточутливих сенсорах з частотним виходом не потрібні аналого-цифрові перетворювачі і підсилювальні пристрої при подальшій обробці інформаційних сигналів, що здешевлює інформаційно-вимірювальну апаратуру, окрім того можлива передача інформації на відстань при роботі сенсорів у надвисоких частотах.

Ключові слова: оптичний сенсор, від'ємний диференціальний опір, автогенератор, фоторезистор, фотодіод.

Постановка проблеми. Вимірювання оптичного випромінювання потрібно в багатьох галузях виробництва і техніки, зокрема, у мікроелектронній технології, сонячній енергетиці, космічних дослідженнях, військовій техніці, ядерній енергетиці, дослідженні довкілля, що потребує створенню вимірювальних приладів високої точності та чутливості, стабільності і швидкодії, а також дослідження впливів всієї сукупності факторів, що супроводжують вимірювальний процес [1, с. 322-346; 2, с. 99-125; 3, с. 307-371; 4, с. 105-132; 5, с. 417-457; 6; 7; 8].

Для вимірювання інтенсивності світла на даний час використовуються напівпровідни-

кові або мікроелектронні сенсори, що виконанні у вигляді мікроелектронних схем з фоторезисторами, фотодіодами та фототранзисторами. Вони знаходять широке застосування у системах автоматики як пристрої вмикання освітлення вулиць, тунелів, приміщень, світлових вогнів аеропортів, сигналізатори вогню та диму, системами стеження за положеннями об'єкта, фотореле різних промислових автоматів, тощо [1, с. 322-346; 9; 10].

На теперішній час більшість фоточутливих сенсорів мають вихідний сигнал у вигляді струму або напруги, що приводить до значних похибок вимірювання внаслідок втрат інформації в каналі

між виходом сенсора і входом підсилювально-перетворювальної апаратури, малих потужностей вихідного сигналу сенсорів, їх низької завадостійкості і швидкодії [11; 12, с. 3-14, с. 61-77, с. 87-96].

Усунути вище перераховані недоліки можливо на основі автогенераторних параметричних сенсорів, що працюють в режимі перетворення «оптичне випромінювання – частота», що дає можливість значно покращити їх метрологічні показники [13, с. 112-182; 14].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Одним з перспективних наукових напрямків у створенні фоточутливих сенсорів є дослідження в області сенсорів на основі реактивних властивостей транзисторних структур з від'ємним диференціальним опором, що дозволяє створювати прилади з частотним вихідним сигналом. Автогенераторні параметричні фоточутливі сенсори поєднують простоту і універсальність, які мають аналогові пристрої, з точністю і завадостійкістю, що характеризують прилади з кодовим виходом. Застосування принципу перетворення «оптичне випромінювання - частота» на основі автогенераторних параметричних фоточутливих сенсорів суттєво зменшує собівартість інформаційно-вимірювальних систем, дозволяє значно зменшити масогабаритні показники фоточутливих сенсорів, підвищити точність і чутливість перетворення оптичного сигналу у частоту [15, с. 35-75; 16; 17; 18; 19; 20].

Постановка завдання. Метою роботи є створення та дослідження оптичних сенсорів на основі мікроелектронних транзисторних структур, в яких фоторезистор і фотодіод виступають як первинні перетворювачі оптичного сигналу, так і як активні елементи автогенераторів в яких втрачає енергію в коливальній системі компенсуються енергією від'ємного диференціального опору, що дозволяє перетворити оптичний сигнал у частоту. Для досягнення поставленої мети у роботі потрібно вирішити такі задачі:

1) провести аналіз існуючих наукових джерел та обґрунтувати використання мікроелектронних транзисторних структур з від'ємним диференціальним опором для побудови оптичних сенсорів з частотним виходом;

2) розробити математичні моделі оптичних сенсорів, в яких враховано залежність параметрів фоточутливих елементів від дії світла та їх вплив на вихідну частоту сенсора;

3) отримати аналітичні вирази параметричної залежності вихідної частоти та чутливості сенсора від дії оптичного сигналу;

4) зробити висновки з проведених досліджень.

Математичні моделі оптичних сенсорів.

Оптичний сенсор з частотним вихідним сигналом будується на основі мікроелектронної транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором, в якій фоточутливим елементом є фоторезистор. На рис. 1 представлена схема мікроелектронного оптичного сенсора. Вона складається з біполярного транзистора VT1 і арсенід галієвого польового транзистора VT2. На електродах колектор–стік існує від'ємний диференціальний опір, що відповідає спадній ділянці вольт-амперної характеристики сенсора. Оптичний сенсор живиться від джерела постійної напруги U1. Ланцюг R1C1 створює додатковий зворотний додатний зв'язок виходу пристрою з входом. Через фоточутливий опір R1 здійснюється живлення бази біполярного транзистора VT2. Ємність C2 здійснює блокувальну роль, тобто захищає джерело постійної напруги U1 від змінних струмів.

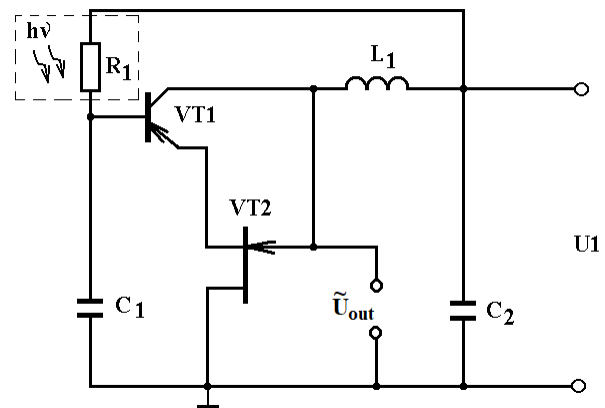


Рис. 1. Електрична схема мікроелектронного оптичного сенсора

Коливальний контур утворений пасивною індуктивністю L1 і ємністю повного опору, який існує на електродах колектора біполярного транзистора і стоку польового транзистора. Ділянка від'ємного опору лежить в області від 2В до 4В, що дає можливість регулювання його величиною за рахунок зміни джерела напруги U1. Під час дії світла на фоторезистор R1 здійснюється зміна активної та реактивної складової повного опору на електродах колектор – стік пристрою, що викликає зміну вихідної частоти оптичного сенсора. Фоточутливим елементом сенсора був фоторезистор типу PGM5516 [21, с. 37-44].

Перейдемо до розгляду залежності параметрів фоторезистора від дії на нього світла. Принцип дії фоторезистора ґрунтується на внутрішньому фотоелефекті. Світло, що падає на напівпровідник фоторезистора, частково поглинається в його об'ємі,

взаємодіючи з атомами кристалічної ґратки або домішок. Поглинання фоторезистором фотонів викликає збільшення провідності напівпровідника, приріст якої називають фотопровідністю. Існує два механізми поглинання фотонів – власний і домішковий. При власному механізмі поглинання фотонів відбувається перехід електронів з валентної зони у зону провідності, коли енергія фотонів дорівнює або більше ширини забороненої зони ($h\nu \geq E_g$). Домішковий механізм поглинання характеризується іонізацією донорного або акцепторного рівня, коли $h\nu > E_i$, де E_i – енергія іонізації домішкових рівнів. Найбільше поширення отримали фоторезистори на основі напівпровідників з власним поглинанням фотонів. Конструкція фоторезисторів складається з півки фоточутливого напівпровідникового матеріалу, який має два омичних контакти для включення їх у електричне коло. Фоторезистори не випрямні прилади, тому їх можна живити як постійним, так і змінним струмом.

Величина фотоструму через напівпровідник фоторезистора визначається формулою [22, с.56].

$$I_F = q \left[\eta_p \frac{\tau_p^f}{t_p} + \eta_n \frac{\tau_n^f}{t_n} \right] a \frac{\Phi}{h\nu} V, \quad (1)$$

де q – заряд електрона; η_p, η_n – квантовий вихід фотоіонізації дірок і електронів, відповідно; τ_p^f, τ_n^f – час життя фотодірок і фотоелектронів, відповідно; t_p, t_n – час дрейфу фотодірок і фотоелектронів під дією електричного поля до омичних контактів, відповідно; a – коефіцієнт поглинання фотонів, Φ – інтенсивність світла, $h\nu$ – енергія фотонів, V – об'єм фоторезистора. За умови, коли $n = p$, $\eta_p = \eta_n = \eta_i$, $\tau_p^f = \tau_n^f = \tau$, при введенні позначення

$$A = \tau \left[\frac{1}{t_p} + \frac{1}{t_n} \right], \quad (2)$$

де параметр A визначає коефіцієнт підсилення фоторезистора [22, с.56]. З врахуванням виразу (2), формула (1) приймає вигляд

$$I_F = q\eta_i A \frac{\Phi}{h\nu} aV, \quad (3)$$

На основі виразу (3), опір фоторезистора, який залежить від дії світла, описується формулою

$$R(\Phi) = \frac{U_\Phi h\nu}{q\eta_i A\Phi aV}, \quad (4)$$

де U_Φ – напруга на фоторезисторі. Згідно формули (4) зміна опору $R(\Phi)$ при дії світла описується виразами

$$\Delta R(\Phi) = \frac{\partial R}{\partial A} \Delta A(\Phi) + \frac{\partial R}{\partial a} \Delta a(\Phi) + \frac{\partial R}{\partial \eta_i} \Delta \eta_i(\Phi) + \frac{\partial R}{\partial \Phi} \Delta \Phi, \quad (5)$$

Провівши диференціювання складових у формулі (5), отримаємо рівняння

$$\Delta R(\Phi) = -\frac{U_\Phi h\nu}{q\eta_i A^2 \Phi aV} \Delta A(\Phi) - \frac{U_\Phi h\nu}{q\eta_i A \Phi a^2 V} \Delta a(\Phi) - \frac{U_\Phi h\nu}{q\eta_i^2 A \Phi aV} \Delta \eta_i(\Phi) - \frac{U_\Phi h\nu}{q\eta_i A \Phi^2 aV} \Delta \Phi. \quad (6)$$

Формула (6) дозволяє аналітично визначити зміну опору фоторезистора від дії оптичного випромінювання.

Перейдемо до визначення параметричної залежності вихідної частоти оптичного сенсора від параметрів фоторезистора і параметрів автогенератора. При вирішенні цієї задачі необхідно розглянути перетворення енергії оптичного випромінювання в енергію змінного електричного поля на виході сенсора. Для цього визначимо коефіцієнт корисної дії сенсора. На першому етапі енергія оптичного випромінювання перетворюється в енергію електричного поля через зміну напруги на фоторезисторі, яка є вхідною напругою для автогенератора пристрою. В подальшому енергія електричного поля, яка визначається напругою на фоторезисторі перетворюється в енергію змінного електричного поля, яка зв'язана з еквівалентною ємністю коливального контуру автогенератора сенсора. Коефіцієнт корисної дії оптичного сенсора дорівнює

$$K = \frac{P_{out}}{P_{in}}. \quad (7)$$

Вихідна потужність описується виразом

$$P_{out} = \frac{C_{ekv} U_-^2}{2t}, \quad (8)$$

де C_{ekv} – еквівалентна ємність коливального контуру автогенератора, U_- – вихідна змінна напруга, t – період коливань змінної вихідної напруги без дії оптичного випромінювання.

Вхідна потужність описується формулою

$$P_{in} = \frac{q\eta_i A \Phi a V U_\Phi}{h\nu}. \quad (9)$$

Таким чином, коефіцієнт корисної дії пристрою приймає вид

$$K = \frac{C_{ekv} U_-^2 h\nu}{2t q \eta_i A \Phi a V U_\Phi}. \quad (10)$$

З формули (10) визначається C_{ekv} , яка описується виразом

$$C_{ekv} = \frac{2K t q \eta_i A \Phi a V U_\Phi}{U_-^2 h\nu}. \quad (11)$$

З другого боку, еквівалентну ємність C_{ekv} можна визначити з формули резонансної частоти автогенератора, яка має вигляд [21, с. 83]

$$F_0 = \frac{1}{2\pi R_g C_{ekv}} \left[\frac{R_g^2 C_{ekv}}{L} - 1 \right]^{1/2}, \quad (12)$$

де R_g – від'ємний диференційний опір коливального контуру, L – індуктивність контуру. З виразу

(12) отримуємо квадратне рівняння, з якого визначаємо C_{ekv}

$$(4\pi^2 F_0^2 R_g^2 L) C_{ekv}^2 - R_g^2 C_{ekv} + L = 0. \quad (13)$$

Введемо позначення

$$m_1 = 4\pi^2 F_0^2 R_g^2 L, \quad (14)$$

$$m_2 = R_g^2, \quad (15)$$

$$m_3 = L, \quad (16)$$

$$m_4 = C_{ekv} = \frac{2Ktq\eta_i A\Phi a V U_\Phi}{U_-^2 h\nu}. \quad (17)$$

тоді C_{ekv} з рівняння (13) дорівнює

$$C_{ekv} = \frac{m_2 \pm \sqrt{m_2^2 - 4m_1 m_3}}{2m_1}. \quad (18)$$

Прирівнявши вираз (18) до виразу (11), отримуємо рівняння для визначення F_0 , яке має вигляд

$$m_1 = \frac{m_2}{m_4} - \frac{m_3}{m_4^2}. \quad (19)$$

Підставивши значення виразів (14) – (17) у формулу (19), отримуємо рівняння

$$(4\pi^2 R_g^2 L) F_0^2 = \frac{R_g^2 U_-^2 h\nu}{2Ktq\eta_i A\Phi a V U_\Phi} - \frac{L U_-^4 (h\nu)^2}{4K^2 t^2 q^2 \eta_i^2 A^2 \Phi^2 a^2 V^2 U_\Phi^2}. \quad (20)$$

З рівняння (20) визначаємо параметричну залежність резонансної частоти сенсора від параметрів первинного перетворювача оптичного випромінювання і параметрів автогенератора, отже

$$F_0 = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{U_-^2 h\nu}{2Ktq\eta_i A\Phi a L V U_\Phi} - \frac{U_-^4 (h\nu)^2}{4K^2 t^2 q^2 \eta_i^2 A^2 \Phi^2 R_g^2 a^2 V^2 U_\Phi^2} \right]^{1/2}. \quad (21)$$

Отримана формула (21) дозволяє простим шляхом розрахувати функцію перетворення сенсора, ніж складним шляхом з еквівалентної схеми сенсора на основі рівнянь Кірхгофа, які можна вирішити на комп'ютері чисельним шляхом. На рис. 2 подано графічну залежність розрахункової та експериментальної кривих функції перетворення оптичного сенсора.

Чутливість сенсора визначається похідною функції (21) за параметром інтенсивності світла Φ . Як показують експериментальні дослідження, вихідна змінна напруга U_- залежить від інтенсивності світла, що необхідно врахувати при визначенні чутливості. З врахуванням цього, функція (21) приймає вигляд

$$F_0 = \frac{1}{2\pi} \left[U_-^2(\Phi) \Phi^{-1} m_5 - U_-^4(\Phi) \Phi^{-2} m_6 \right]^{1/2}. \quad (22)$$

де

$$m_5 = \frac{h\nu}{2Ktq\eta_i A U_\Phi L a V}, \quad (23)$$

$$m_6 = \frac{(h\nu)^2}{4K^2 t^2 q^2 \eta_i^2 A^2 U_\Phi^2 R_g^2 a^2 V^2}. \quad (24)$$

Чутливість сенсора описується формулою

$$S_{F_0} = \frac{1}{4\pi} \left[U_-^2(\Phi) \Phi^{-1} m_5 - U_-^4(\Phi) \Phi^{-2} m_6 \right]^{-1/2} \times \left[\left(2U_- (\Phi) \frac{dU_- (\Phi)}{d\Phi} \Phi^{-1} m_5 - U_-^2(\Phi) \Phi^{-2} m_6 \right) - \left(4U_-^3(\Phi) \frac{dU_- (\Phi)}{d\Phi} \Phi^{-2} m_6 - 2U_-^4(\Phi) \Phi^{-3} m_6 \right) \right]. \quad (25)$$

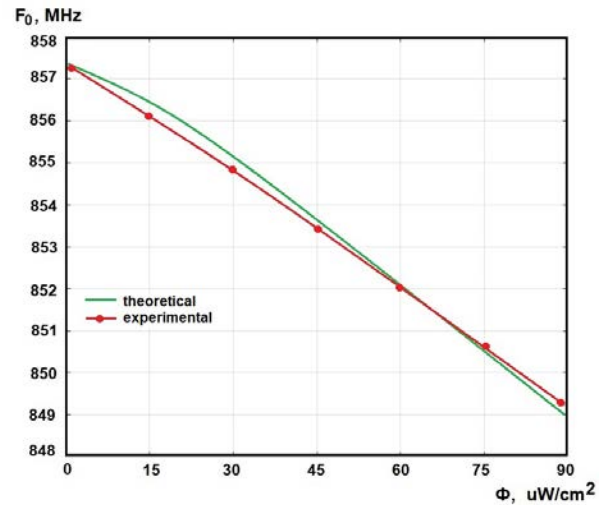


Рис. 2. Залежність розрахункової та експериментальної кривих функцій перетворення від оптичної потужності

Графік чутливості сенсора від оптичної потужності подано на рис. 3.

Як видно з графіка (рис.3), чутливість в діапазоні від 0 до 90 мкВт/см² складала від 88,1 кГц/ мкВт/см² до 93,5 кГц/ мкВт/см².

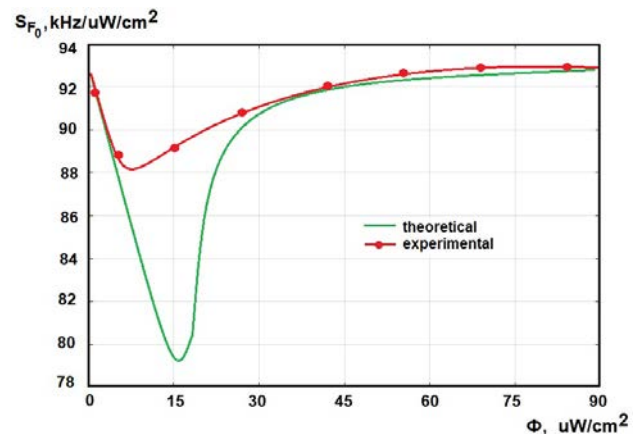


Рис. 3. Розрахункова та експериментальна залежності функції чутливості сенсора від оптичної потужності

Подальше покращення метрологічних параметрів оптичних сенсорів можливо отримати на основі автогенераторного параметричного пристрою з використанням в якості первинного перетворювача оптичної потужності фоточутливого діода.

Електрична схема оптичного сенсора подано на рис. 4. Вона уявляє собою інтегральну мікро-

електронну схему, що складається з двох біполярних транзисторів VT1 і VT2 з різними типами провідності, що приводить до появи від'ємного диференційного опору на електродах колектор-колектор транзисторів. Фоточутливий діод типу BPW20RF VD1 включено у коло зворотного позитивного зв'язку. На електродах колектор-колектор VT1 і VT2 існує повний опір, активна складова якого має від'ємне значення, а реактивна – емнісний характер. Підключення індуктивності L1 до колектора VT1 і верхнього виводу ємності C1 створює коливальний контур, втрати енергії в якому компенсуються енергією від'ємного диференційного опору. Ємність C1 запобігає проходженню змінного високочастотного струму через джерело постійної напруги U1, що живить схему пристрою. Резонансна частота коливального контуру залежить від дії світла на фоточутливий діод VD1, оскільки змінюється його струм, що приводить до зміни еквівалентної ємності і від'ємного диференційного опору у коливальній системі автогенератора сенсора.

Фоточутливий діод включено у зворотному режимі, тобто його зворотній струм складається з двох частин, одна з яких є темновим струмом, який не залежить від дії оптичного випромінювання, а друга частина є фоточутливим струмом, що визначається дією оптичного випромінювання.

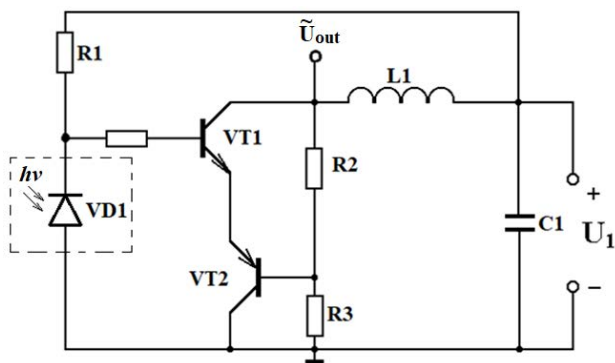


Рис. 4. Електрична схема мікроелектронного оптичного сенсора

Величина фотоструму фоточутливого діода визначається формулою [22]

$$I_F = q\eta_i a \frac{\Phi}{h\nu} V. \quad (26)$$

Формула (26) відрізняється від формули (3), яка визначає фотострум фоторезистора, тим що в ній відсутній множник A , тому що фотодіод не підсилює фотострум. Темновий опір фотодіода значно більше, ніж у фоторезистора, оскільки він визначається зворотним струмом р-п переходу, який є незначним і складає для кремнієвих

фотодіодів декілька мікроампер. Внаслідок цього відношення темнового опору до опору при дії оптичного випромінювання у фотодіода значно більше, ніж у фоторезистора. Головною перевагою фотодіодів перед фоторезисторами є їх мала інерційність. Згідно формули (26), опір діода при дії світла описується виразом

$$R(\Phi) = \frac{U_\Phi E_\Phi}{q\eta_i a \Phi V}, \quad (27)$$

де $E_\Phi = h\nu$ – енергія фотонів оптичного випромінювання. Приріст фотоопору діода має вигляд

$$\Delta R(\Phi) = \frac{\partial R}{\partial \eta_i} \Delta \eta_i(\Phi) + \frac{\partial R}{\partial a} \Delta a(\Phi) + \frac{\partial R}{\partial \Phi a} \Delta \Phi. \quad (28)$$

Виконавши диференціювання у виразі (28), отримаємо

$$\Delta R(\Phi) = -\frac{E_\Phi U_\Phi}{q a \Phi V} \eta_i^{-2} \Delta \eta_i(\Phi) - \frac{E_\Phi U_\Phi}{q \eta_i \Phi V} a^{-2} \Delta a(\Phi) - \frac{E_\Phi U_\Phi}{q \eta_i a V} \Phi^{-2} \Delta \Phi. \quad (29)$$

Визначивши залежність зміни фоточутливого опору діода від оптичної потужності, перейдемо до визначення параметричної залежності вихідної частоти сенсора від зміни оптичної потужності. Ця залежність визначається аналогічним чином як і для оптичного сенсора з фоторезистором, яка розглянута вище. Вхідна потужність для автогенератора сенсора визначається на основі виразів (26) і (27)

$$P_{in} = \frac{U_\Phi q \eta_i a \Phi V}{E_\Phi}. \quad (30)$$

Вихідна потужність визначається формулою (8). Отже, виходячи з формул (8) і (30), коефіцієнт корисної дії сенсора дорівнює

$$K = \frac{C_{ekv} U_\Phi^2 E_\Phi}{2t U_\Phi q \eta_i a \Phi V}. \quad (31)$$

З рівняння (31) визначається величина C_{ekv} , яка має вигляд

$$C_{ekv} = \frac{2K t U_\Phi q \eta_i a \Phi V}{U_\Phi^2 E_\Phi}. \quad (32)$$

З другого боку, еквівалентна ємність коливального контуру автогенератора зв'язана з резонансною частотою виразом (12). Підставивши у формулу (12) вираз (32) і провівши необхідні перетворення, отримуємо параметричну залежність вихідної резонансної частоти від оптичної потужності, а також параметрів фотодіода і параметрів автогенератора. Ця залежність описується рівнянням

$$F_0 = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{U_\Phi^2 E_\Phi}{2\eta_i t U_\Phi q K L a \Phi V} - \frac{U_\Phi^4 E_\Phi^2}{4\eta_i^2 t^2 U_\Phi^2 q^2 K^2 R_g^2 a^2 \Phi^2 V^2} \right]^{1/2}. \quad (33)$$

Вираз (33) є функцією перетворення оптичного сенсора. На рис.5 подано розрахункову і експериментальну залежності функції перетворення від дії оптичної потужності на сенсор. Відносна

похибка між розрахунками і експериментом складає 5 % при вимірюванні оптичної потужності величиною 90 мкВт/см².

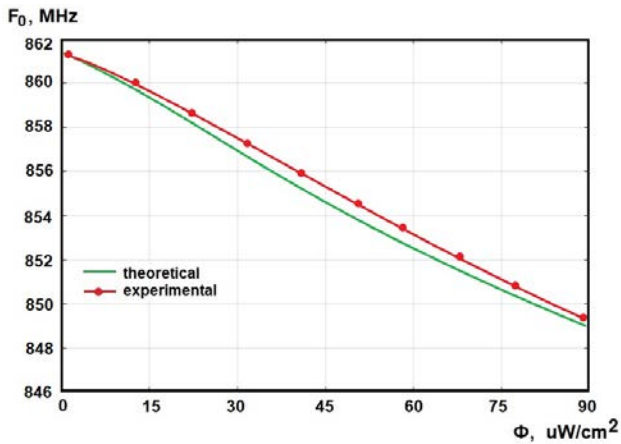


Рис. 5. Розрахункова та експериментальна залежності функції перетворення від оптичної потужності

Як видно з графіка (рис. 5), вихідна частота змінюється від 861,5 МГц до 849,5 МГц при зміні оптичної потужності від 0 мкВт/см² до 90 мкВт/см².

Функція чутливості сенсора визначається на основі виразу (33) при цьому вважається, що вихідна напруга сенсора також залежить від оптичної потужності. Отже, функція чутливості описується виразом

$$S_{\epsilon_i} = \frac{1}{4\pi} [U^2(\Phi)\Phi^{-1}m_7 - U^4(\Phi)\Phi^{-2}m_8]^{-1/2} \times \left[\left[2U_1(\Phi) \frac{dU_1(\Phi)}{d\Phi} \Phi^{-1}m_7 - \right. \right. \\ \left. \left. - U^2(\Phi)\Phi^{-2}m_7 \right) - \left(4U^2(\Phi) \frac{dU_1(\Phi)}{d\Phi} \Phi^{-2}m_8 - 2U^4(\Phi)\Phi^{-3}m_8 \right) \right] \quad (34)$$

де

$$m_7 = \frac{E_{\Phi}}{2K\eta_i t U_{\Phi} q L a V} \quad (35)$$

$$m_8 = \frac{E_{\Phi}^2}{4K^2 \eta_i^2 t^2 U_{\Phi}^2 q^2 R_s^2 a^2 V^2} \quad (36)$$

На рис. 6 подано розрахункові та експериментальні залежності функції чутливості від дії оптичної потужності на сенсор.

Як видно з графіка (рис. 6), чутливість сенсора складає від 125,2 кГц/мкВт/см² до 134,8 кГц/мкВт/см² в діапазоні вимірюваної оптичної потужності від 0 мкВт/см² до 90 мкВт/см².

Частотний діапазон автогенераторних параметричних сенсорів оптичного випромінювання на основі транзисторних мікроелектронних структур з від'ємним диференціальним опором з первинними фоточутливими елементами типу фоторезистора і фотодіода вибраний в LTE-800 Downlink. Діапазон 3GPP B20 (800 МГц) LTE є другим за популярністю діапазоном, що використовується операторами

мобільного зв'язку загального користування для розгортання мереж LTE, а також добре підходить для широкого охоплення в регіональних умовах для покриття всередині будівель технології Інтернет речей: NB-IoT (LTE Cat-NB1) у зв'язку з переходом телемовних компаній на цифрове мовлення. Використання спектру 800 МГц допомагає операторам швидше запустити послуги LTE та задовольнити вимоги ринку. Багатьом операторам, що використовують смугу частот B20, вдалося досягти загальнонаціонального або національного покриття в найкоротші терміни [23, 24].

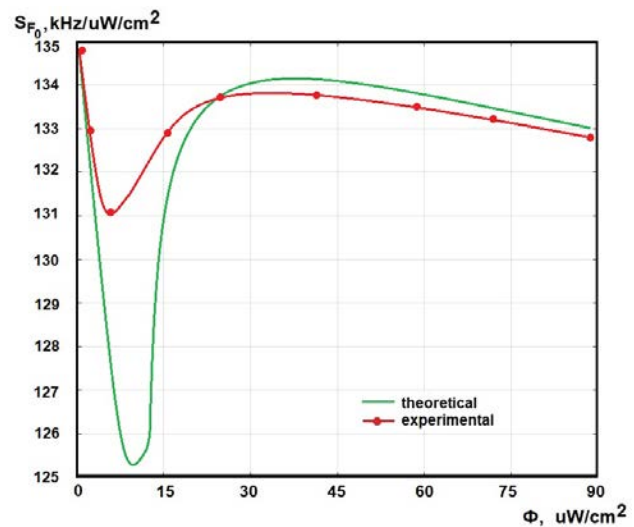


Рис. 6. Розрахункова та експериментальна залежності функції чутливості від оптичної потужності

Оператори мобільного зв'язку можуть гнучко розгорнути LTE, використовуючи смугу 20 МГц як одну смугу або як частину багатодіапазонної мережі, за повідомленнями, з більш ніж 175 комерційними мережами у 79 країнах та територіях (квітень 2018 р.). Технології LTE-A або LTE-Advanced Pro можуть бути розгорнуті з використанням агрегації несучих для об'єднання різних смуг частот 20 МГц діапазону з іншими несучими. Діапазон B20 (800 МГц) також є надзвичайно популярним вибором для eMTC (LTE Cat M1) та NB-IoT (LTE Cat NB1) через характеристики глибокого проникнення та широкого покриття [23, 24].

Експериментальні дослідження проведено за допомогою спектроаналізатора Arinst SSA TG-LC. На рис. 7 представлено спектр автогенераторного параметричного сенсора оптичного випромінювання на основі транзисторної мікроелектронної структури в діапазоні LTE-800 Downlink, частота передачі складає 849,8 МГц.

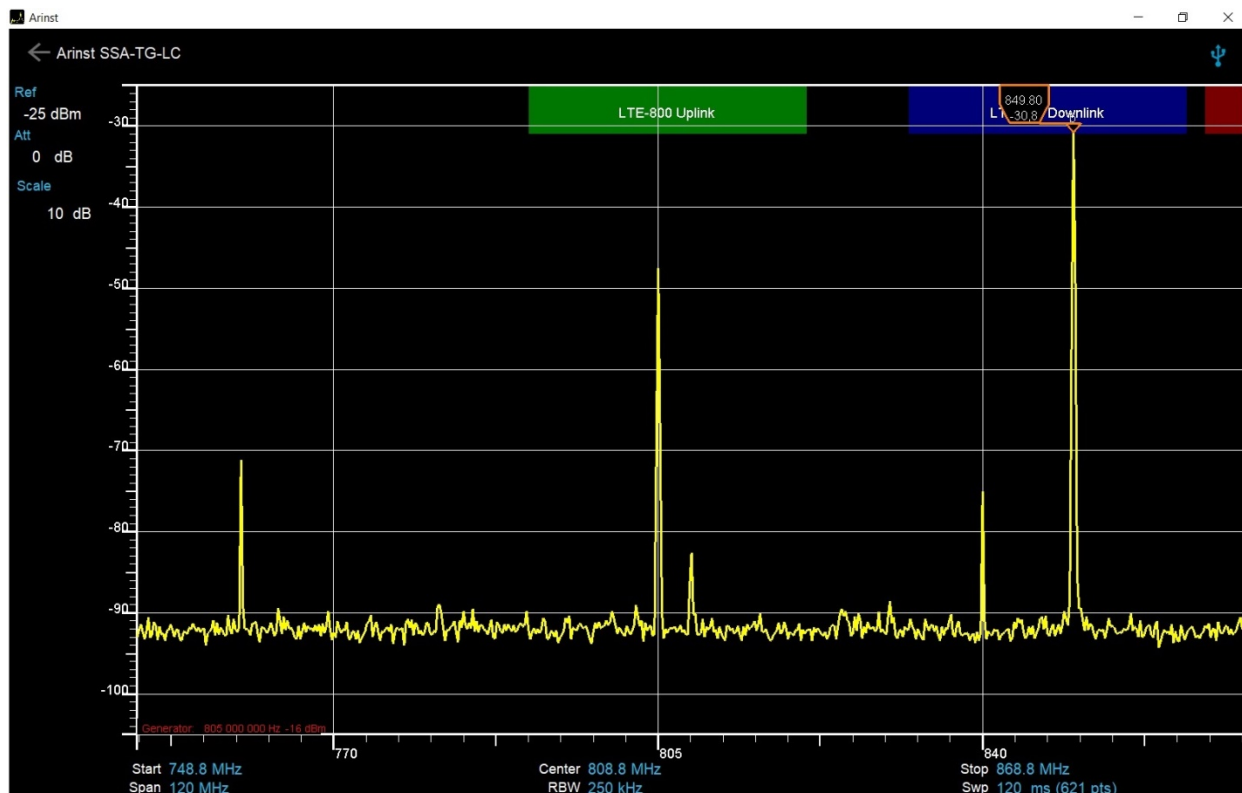


Рис. 7. Спектр автогенераторного параметричного сенсора оптичного випромінювання на основі транзисторної мікроелектронної структури

Висновки

1. Запропоновано автогенераторні параметричні сенсори оптичного випромінювання на основі транзисторних мікроелектронних структур з від'ємним диференціальним опором з первинними фоточутливими елементами типу фоторезистора і фотодіода, причому первинні фоточутливі перетворювачі є активними елементами схем автогенераторів, що спрощує конструкцію сенсорів.

2. Виходячи з розгляду фізичних процесів у первинних фоточутливих елементах і автогенераторах, розроблено математичні моделі оптичних сенсорів, на основі яких отримано параметричні залежності функцій перетворення і чутливості. Показано, що основний внесок у зміну функції перетворення вносить зміна оптичної потужності. Це викликає зміну еквівалентної ємності і від'ємного диференціального опору коливальної системи автогенераторів сенсорів, що, у свою чергу, змінює вихідну частоту приладів. Чутли-

вість оптичних сенсорів змінюється від 125,2 кГц/мкВт/см² до 134,8 кГц/мкВт/см² в діапазоні вимірюваної оптичної потужності від 0 мкВт/см² до 90 мкВт/см².

3. Отримані параметричні залежності функцій перетворення оптичних сенсорів показують можливість значно простіше розрахувати основні характеристики сенсорів і наочно демонструють вплив кожного елемента первинних перетворювачів і елементів автогенераторів на вихідну частоту сенсорів у порівнянні з розрахунками функцій перетворення з еквівалентних схем пристроїв на основі рівнянь Кірхгофа. У фоточутливих сенсорах з частотним виходом не потрібні аналого-цифрові перетворювачі і підсилювальні пристрої при подальшій обробці інформаційних сигналів, що здешевлює інформаційно-вимірювальну апаратуру, окрім того можлива передача інформації на відстань при роботі сенсорів у надвисоких частотах.

Список літератури:

1. Мартинес-Дуарт Дж. М. Нанотехнологии для микро- и оптоэлектроники / Дж. М. Мартинес-Дуарт, Р. Дж. Мартин-Палма, Ф. Агулло-Руеда. – Москва: Техносфера, 2007. – 368 с.
2. Мікроелектронні сенсори фізичних величин. Том. 3, кн. 1. За редакцією З.Ю. Готри. – Львів: Ліга-Прес. 2007. – 546 с.

3. Schaumburg H. Sensoren. – Stuttgart: Teubner, 1992. – 517 p.
4. Джексон Р.Г. Новейшие датчики. – Москва: Техносфера, 2007. – 384 с.
5. Датчики: Справочное пособие / Под общ. ред. В.М. Шарапова, Е.С. Полищука. – Москва: Техносфера, 2012. – 624с.
6. Thomas Allsop, Ronald Neal. Application and Implementation of Optic Fibre Sensors for Gas Detection // Sensors 2021, 21, 6755. <https://doi.org/10.3390/s21206755>
7. Jasmine Chan, Zhou Zheng, Kevan Bell, Martin Le, Parsin Haji Reza and John T.W. Yeow. Photoacoustic Imaging with Capacitive Micromachined Ultrasound Transducers: Principles and Developments // Sensors 2019, 19, 3617; doi:10.3390/s19163617
8. Edrine Damulira, Muhammad Nur Salihin Yusoff, Ahmad Fairuz Omar and Nur Hartini Mohd Taib. A Review: Photonic Devices Used for Dosimetry in Medical Radiation // Sensors 2019, 19, 2226; doi:10.3390/s19102226
9. Dong-Geon Lee, Dooho Choi, Jungtaek Seo, Howon Kim. Reset Tree-Based Optical Fault Detection // Sensors 2013, 13, 6713-6729; doi:10.3390/s130506713
10. Ofer Levi, Thomas T. Lee, Meredith M. Lee, Stephen J Smith, and James S. Harris, "Integrated semiconductor optical sensors for cellular and neural imaging," Appl. Opt. 46, 2007. P. 1881-1889.
11. José Luis Santos, Faramarz Farahi. Optical Waveguide Sensors from: Handbook of Optical Sensors CRC Press Accessed, 2022. – 43 p. <https://www.routledgehandbooks.com/doi/10.1201/b17641-6>
12. Martellucci S., Arthur N. Chester, Anna Grazia Mignani. Optical Sensors and Microsystems. Springer, Boston, MA, 2000. – 318 p. <https://doi.org/10.1007/b115495>
13. Осадчук В.С., Осадчук О.В., Вербицкий В.Г. Температурні та оптичні мікроелектронні частотні перетворювачі. –Вінниця:«Універсум-Вінниця», 2001.– 195 с.
14. Osadchuk A.V., Osadchuk V.S., Osadchuk I.A., Maksat Kolimoldayev, Paweł Komada, Kanat Mussabekov. Optical transducers with frequency output. Proc. SPIE 10445, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments, 2017, 104451X (2017).
15. Осадчук В.С., Осадчук О.В. Реактивные свойства транзисторов и транзисторных схем. Винниця: «Универсум-Винниця», 1999. – 275 с.
16. Osadchuk A.V., Osadchuk V.S., Osadchuk I.A., Seletskaya O.O., Kisała P., Nurseitova K. Theory of photoreactive effect in bipolar and MOSFET transistors. Proceedings SPIE Volume 11176, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments, 2019; 111761I (2019).
17. Osadchuk A.V., Osadchuk V.S., Osadchuk I.A., Ilchuk D.R., Pastushenko G.A. Solid State Radio-Measuring Optical-Frequency Transducer of Gas Flow Rate // Physics and chemistry of solid state. V. 22, No. 2 (2021). –P. 224-232. DOI: 10.15330/pcss.22.2.224-232
18. Osadchuk A.V., Osadchuk I.O., Semenov A.O.. The Mathematical Model of Radio-measuring Frequency Transducer of Optical Radiation Based on MOS Transistor Structures with Negative Differential Resistance // Journal of Nano- and Electronic Physics. Scientific journal. ISSN 2077-6772. Vol. 13 No 4, 04001(6 pp) (2021) DOI: 10.21272/jnep.13(4).04001
19. Vladimir S. Osadchuk, Oleksandr V. Osadchuk, Olena M. Zhahlovska, Saule Luganskaya, Andrzej Kociubiński. Development of the construction sketch of N-channel MOS-phototransistor with bilateral illumination of channel and operation card of its making // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering, Volume 10808, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2018; 108080R, 2018, –P. 1-16.
20. Osadchuk A.V., Osadchuk V.S., Seletskaya O.O., Krylik L.V. Optical frequency transducer based on dual-gate mosfet with an active inductive element// Information and Telecommunication Sciences, 2017, Volume 9, Number 2., National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”. P. 61-68.
21. Осадчук В.С., Осадчук О.В., Селецька О.О. Радіовимірювальні оптичні перетворювачі для мікроелектронної технології. – Вінниця: ВНТУ, 2013. – 160 с.
22. Викулин В.М., Стафеев В.И. Физика полупроводниковых приборов. –М.: Радио и связь, 1990. – 265 с.
24. <https://halberdbastion.com/technology/cellular/4g-lte/lte-frequency-bands/b20-800-mhz>
25. Mikko Valkama, Jarno Niemelä. SAINJU, PRABHAT MAN: LTE performance analysis on 800 and 1800 MHz Bands. Master of Science Thesis. Tampere university of technology, 2012. – 82 p.

Osadchuk A.V., Osadchuk V.S., Osadchuk I.O. RESEARCH OF AUTOGENERATOR PARAMETRIC OPTICAL SENSORS

Self-oscillating parametric sensors for optical radiation based on transistor microelectronic structures with negative differential resistance with primary photosensitive elements such as a photoresistor and a photodiode

are proposed, moreover, primary photosensitive converters are active elements of self-oscillator circuits, which simplifies the design of sensors.

Based on the consideration of physical processes in primary photosensitive elements and self-oscillators, mathematical models of optical sensors have been developed, on the basis of which the transformation and sensitivity functions have been obtained. It is shown that the main contribution to the change in the conversion function is the change in the optical power. This causes a change in the equivalent capacitance and negative differential resistance of the oscillatory system of sensor self-oscillators, which in turn changes the output frequency of the devices. The sensitivity of optical sensors varies from 125.2 kHz/ μ W/cm² to 134.8 kHz/ μ W/cm² in the range of measured optical power from 0 to 90 μ W/cm².

The obtained parametric dependences of the conversion functions of optical sensors show that it is easier to obtain the main characteristics of the sensors and clearly demonstrate the influence of each parameter of the primary converters and self-oscillator elements on the output frequency of the sensors in comparison with the calculations of the conversion functions from equivalent device circuits based on the Kirchhoff equations. Photosensitive sensors with a frequency output do not require analog-to-digital converters and amplifying devices for further processing of information signals, which reduces the cost of information-measuring equipment, in addition, it is possible to transmit information over a distance when the sensors operate at microwave frequencies.

Key words: *optical sensor, negative differential resistance, self-oscillator, photoresistor, photodiode.*

Відомості про авторів

Арпентій С.П. – старший науковий співробітник Українського науково-дослідного інституту спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України

Баламут Н.С. – аспірант кафедри технічної електрохімії Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Білик О.В. – аспірантка кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем Вінницького національного технічного університету

Бурлаченко Д.А. – старший викладач кафедри судноводіння і морська безпека Одеського національного морського університету, капітан далекого плавання

Вакалюк Т.А. – доктор педагогічних наук, професор, професор кафедри інженерії програмного забезпечення Державного університету «Житомирська політехніка»

Валявська Н.О. – кандидат економічних наук, доцент кафедри бізнес-логістики та транспортних технологій Державного університету інфраструктури та технологій

Волянська Я.Б. – доктор технічних наук, професор кафедри електричної інженерії судових та роботизованих комплексів Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

Герасименко О.О. – магістр кафедри інформаційних технологій та дизайну Державного університету інфраструктури та технологій

Горбань Г.В. – кандидат технічних наук, доцент кафедри інженерії програмного забезпечення Чорноморського національного університету імені Петра Могили

Гришкун Є.О. – старший викладач кафедри інженерії програмного забезпечення Державного університету «Житомирська політехніка»

Завгородній В.В. – доктор технічних наук, доцент, завідувач кафедри інформаційних технологій та дизайну Державного університету інфраструктури та технологій

Завгородня Г.А. – кандидат технічних наук, доцент кафедри інформаційних технологій та дизайну Державного університету інфраструктури та технологій

Зінов'єва О.Г. – старший викладач кафедри комп'ютерних наук Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного

Казмиренко Ю.О. – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри матеріалознавства і технології металів Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

Калініченко Є.В. – кандидат технічних наук, завідувач кафедри навігації і керування судном Одеського національного морського університету, капітан далекого плавання

Калюжний О.В. – магістр кафедри інформаційних технологій та дизайну Державного університету інфраструктури та технологій

Кандиба І.О. – викладач кафедри інженерії програмного забезпечення Чорноморського національного університету імені Петра Могили

Кануннікова Н.О. – PhD, науковий співробітник кафедри технічної електрохімії Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Касіяненко Д.В. – студент кафедри програмних систем і технологій, факультету інформаційних технологій Київського національного університету імені Тараса Шевченка

Кириченко К.В. – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри управління судном Херсонської державної морської академії

Кобзев О.В. – кандидат технічних наук, доцент кафедри хімічної технології неорганічних речовин, каталізу та екології Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Колесніков В.Г. – кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник Інституту радіофізики та електроніки імені О.Я. Усикова Національної академії наук України

Корякін К.С. – старший викладач кафедри судноводіння і морської безпеки Одеського національного морського університету

Лаговський О.М. – здобувач кафедри інженерії програмного забезпечення Державного університету «Житомирська політехніка»

Лебедєв В.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технології пластичних мас і біологічно активних полімерів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Лебедєва Н.Ю. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри матеріалознавства і технології металів Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

Логінов О.В. – кандидат технічних наук, доцент кафедри судноводіння і морської безпеки Одеського національного морського університету

Лубко Д.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних наук Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного

Макруха Т.О. – кандидат технічних наук, асистент кафедри матеріалознавства і технології металів Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

Мельник О.М. – кандидат технічних наук, доцент кафедри судноводіння і морської безпеки Одеського національного морського університету, капітан далекого плавання

Мірошниченко Д.В. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри технології переробки нафти, газу та твердого палива Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Окунькова О.О. – старший викладач кафедри комп'ютерної інженерії та кібербезпеки Державного університету «Житомирська політехніка»

Осадчук В.С. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри радіотехніки Вінницького національного технічного університету

Осадчук О.В. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри радіотехніки Вінницького національного технічного університету

Осадчук Я.О. – кандидат технічних наук, доцент кафедри радіотехніки Вінницького національного технічного університету

Пінаєв Б.О. – аспірант кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем Вінницького національного технічного університету

Проскуренко Д.М. – студент 6 курсу групи ПБ-01мп кафедри виробництва приладів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Савченко Д.О. – студент кафедри технології жирів та продуктів бродіння Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Семенов А.О. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем Вінницького національного технічного університету

Семенова О.О. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інфокомунікаційних систем і технологій Вінницького національного технічного університету

Степовий А.В. – магістр кафедри інформаційних технологій та дизайну Державного університету інфраструктури та технологій

Тихомирова Т.С. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри хімічної техніки та промислової екології Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Ткаченко М.П. – викладач кафедри олімпійського та професійного спорту Чорноморського національного університету імені Петра Могили

Третяк О.В. – студентка 6 курсу групи ПБ-01мп кафедри виробництва приладів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Філіппова М.В. – кандидат технічних наук, доцент, 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

Хлопенко І.М. – аспірант PhD Херсонської державної морської академії

Хлопенко М.Я. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри судового електрообладнання та засобів автоматики Херсонської державної морської академії

Хміль Н.В. – кандидат біологічних наук, старший науковий співробітник Інституту радіофізики та електроніки імені О.Я. Усикова Національної академії наук України

Хміль С.І. – генеральний директор Харківського підшипникового заводу «ХАРП»

Чижмотря О.В. – старший викладач кафедри інженерії програмного забезпечення Державного університету «Житомирська політехніка»

Чижмотря О.Г. – старший викладач кафедри інженерії програмного забезпечення Державного університету «Житомирська політехніка»

Шаров С.В. – кандидат педагогічних наук, доцент, доцент кафедри комп’ютерних наук Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного

Шпильовий О.О. – аспірант кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем Вінницького національного технічного університету

Штефан В.В. – доктор технічних наук, професор кафедри технічної електрохімії Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Щенявський Г.С. – викладач кафедри судноводіння і морська безпека Одеського національного морського університету

Яглицький Ю.К. – кандидат технічних наук, доцент кафедри суднобудування та ремонту суден Херсонського навчально-наукового інституту Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

Янчук В.М. – кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри автоматизації та комп’ютерно-інтегрованих технологій імені професора Б.Б. Самотокіна Державного університету «Житомирська політехніка»

Науковий журнал

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

Серія: Технічні науки

Том 33 (72) № 3 2022

Коректура • *Н. Пирог*

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. 10,57. Ум. друк. арк. 13,72. Зам. № 0522/199

Підписано до друку 31.05.2022. Наклад 150 прим.

Видавництво і друкарня – Видавничий дім «Гельветика»

65101, м. Одеса, вул. Інглезі, 6/1

Телефон +38 (048) 709 38 69,

+38 (095) 934 48 28, +38 (097) 723 06 08

E-mail: mailbox@helvetica.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

ДК № 6424 від 04.10.2018 р.