

**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 29 (68) № 6 2018

Частина 1

**Київ
2018**

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;

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

Дубко Валерій Олексійович – доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри автоматизованого управління технологічними процесами Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;

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 автоматизованого управління технологічними процесами Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;

Кузьменко Борис Володимирович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри автоматизованого управління технологічними процесами Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;

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

Чумаченко Сергій Миколайович – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, професор кафедри автоматизованого управління технологічними процесами Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;

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

**Рекомендовано до друку та поширення через мережу Internet
Вченою радою Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського
(протокол № 4 від 20.12.2018 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 з технічних наук відповідно Наказу Міністерства освіти і науки України від 28.12.2017 № 1714 (додаток 7)

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

ЗМІСТ

ПРИКЛАДНА ГЕОМЕТРІЯ, ІНЖЕНЕРНА ГРАФІКА ТА ЕРГОНОМІКА

Данова К.В.

ОЦІНКА СЕНСОРНИХ ОБМЕЖЕНЬ ОСІБ З ІНВАЛІДНІСТЮ В АСПЕКТІ БЕЗПЕКИ ПРАЦІ1

МАШИНОЗНАВСТВО

Мартиненко В.Г., Львов Г.І.

ЧИСЕЛЬНО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПРОЦЕДУРА ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНИХ
ХАРАКТЕРИСТИК ТА МІЦНОСТІ АРМОВАНОВОГО КОМПОЗИТА..... 7

Поліщук М.М.

ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ МОБІЛЬНОГО РОБОТА З ГАЗОВИМ НАКОПИЧУВАЧЕМ ЕНЕРГІЇ...15

Рудик А.В., Венжега В.І.

ЕФЕКТИВНЕ ШЛІФУВАННЯ ПОВЕРХОНЬ ОБЕРТАННЯ
ЗА РАХУНОК КЕРУВАННЯ КОНТАКТОМ..... 22

ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ У МАШИНОБУДУВАННІ

Лавінський Д.В., Морачковський О.К.

АНАЛІЗ ДЕФОРМУВАННЯ КОНСТРУКЦІЙ ДЛЯ ПРЕСУВАННЯ ПОРОШКІВ
У РАЗІ ДІЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ..... 28

АВІАЦІЙНА ТА РАКЕТНО-КОСМІЧНА ТЕХНІКА

Єнчев С.В., Таку С.О.

РОЗРОБКА АДАПТИВНОГО НЕЙРОМЕРЕЖЕВОГО РЕГУЛЯТОРА
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ АВІАЦІЙНИМ ДВИГУНОМ.....34

Olali N.V., Olali M.O., Orukari M., Jumbo E.E.

A MODEL OF COMPRESSOR BLADES CONTAMINATION IN AVIATION GTE IN OPERATION.....40

Щербань А.П., Ларін В.Ю., Маслов В.П., Качур Н.В.

СПОСІБ КОНТРОЛЮ ЛІТІЙ ПОЛІМЕРНОЇ АКУМУЛЯТОРНОЇ БАТАРЕЇ
БЕЗПЛОТНОГО ПОВІТРЯНОГО СУДНА..... 48

ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

Голубєва С.М., Морнева М.О., Торопов А.С.

ПОРІВНЯЛЬНА ОЦІНКА СИСТЕМ ГРАФІЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ І ПРИНЦИПІВ
АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЕКТУВАННЯ ПІД ЧАС ВИКОРИСТАННЯ СТУДЕНТАМИ
ІНЖЕНЕРНИХ СПЕЦІАЛЬНОСТЕЙ..... 53

Кириченко О.С., Білок І.С., Шарейко Д.Ю., Фоменко А.М., Гаврилов С.О., Бугрім Л.І.

ЧИСЕЛЬНЕ ТРИМІРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО ОХОЛОДЖУВАЧА
ВИМІРЮВАЛЬНОГО ЕЛЕКТРОУСТАТКУВАННЯ АВТОМАТИЧНИХ СИСТЕМ..... 58

Коваленко М.А., Маляр І.В.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ СТЕНД З МАЛОПОТУЖНИМ ТРИФАЗНИМ
АСИНХРОННИМ ДВИГУНОМ З КОРОТКОЗАМКНЕНИМ РОТОРОМ.....64

РАДІОТЕХНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

Лисенко О.І., Новіков В.І., Петрова В.М., Гуйда О.Г.

ПРОЦЕДУРА СИНТЕЗУ ТОПОЛОГІЇ БЕЗПРОВІДНОЇ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ МОНІТОРИНГУ
ЦІЛЕЙ ІЗ МІНІМІЗАЦІЄЮ ЗАГАЛЬНОЇ ПОТУЖНОСТІ ПЕРЕДАЧІ ВУЗЛІВ.....69

ІНФОРМАТИКА, ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ

Андрощук Г.В., Пелих С.Н.

РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ АВТОМАТИЧНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ВЛАСТИВОСТЯМИ
ЯДЕРНОГО ПАЛИВА ВВЕР-1000 ДЛЯ ПРОГРАМИ РЕГУЛЮВАННЯ ПОТУЖНОСТІ РЕАКТОРА
З ПОСТІЙНОЮ СЕРЕДНЬОЮ ТЕМПЕРАТУРОЮ ТЕПЛОНОСІЯ.....73

Биряк В.В.

НАЗНАЧЕНИЕ ОБОРУДОВАНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И ЗАЩИТЫ. РЕЖИМЫ РАБОТЫ
ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СИСТЕМ СУЗ. МОДЕЛЬ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕГУЛИРУЮЩЕЙ ГРУППЫ
ОГРАНОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ СУЗ НА ЗАЭС.....79

Бланарь П.Г., Улицкая Е.О.

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ КОНТУРА ГЕНЕРАЦИИ
ТЕПЛОЙ ЭНЕРГИИ КОГЕНЕРАЦИОННОЙ УСТАНОВКИ.....85

Бойко О.В., Пелих С.В.

РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ
УПРАВЛІННЯ ВЛАСТИВОСТЯМИ ЯДЕРНОГО ПАЛИВА ВВЕР-1000
ДЛЯ ПРОГРАМИ РЕГУЛЮВАННЯ ПОТУЖНОСТІ РЕАКТОРА
З ПОСТІЙНИМ ТИСКОМ ПАРИ ДРУГОГО КОНТУРУ.....91

Бородкіна І.Л., Бородкін Г.О.

ІНФОРМАЦІЙНА ПІДТРИМКА МАРКЕТИНГОВОЇ ДІЯЛЬНОСТІ
НА РИНКУ ВЕТЕРИНАРНОЇ ПРОДУКЦІЇ97

Вербицкий В.Г., Полякова Н.П., Татиевский Д.Н.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ УПРАВЛЯЕМОГО ДВИЖЕНИЯ
АВТОПОЕЗДА ВДОЛЬ ПРОГРАММНОЙ КРИВОЙ.....103

Власюк А.П., Жуковська Н.А., Жуковський В.В., Шендера І.М.

МАТЕМАТИЧНЕ ТА КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОСТОРОВИХ ДЕФОРМАЦІЙНИХ
ПРОЦЕСІВ ҐРУНТОВИХ МАСИВІВ З УРАХУВАННЯМ ТЕПЛОМАСОПЕРЕНЕСЕННЯ
ТА СИЛ ЗВ'ЯЗНОСТІ.....111

Вовк І.В., Беглов К.В.

МОДЕЛЮВАННЯ ВОДОГРІЙНИХ КОТЛІВ ПРИ ГЛИБОКИХ ЗБУРЕННЯХ ЗА ЗМІСТОМ ПАЛИВА.....116

Водка О.О., Панаріна О.Д.

РОЗРОБКА МЕТОДІВ КОМП'ЮТЕРНОГО СИНТЕЗУ ТА АНАЛІЗУ
ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРІАЛІВ НЕОДНОРІДНОЇ СТРУКТУРИ.....122

Дмитришин С.С., Давидов В.О.

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ГОРІННЯ ВУГЛЕВОДНИХ ГАЗІВ
У ПАРОГЕНЕРУЮЧИХ УСТАНОВКАХ ШЛЯХОМ ЗМІНИ ВІДНОШЕННЯ ПАЛЬНЕ/ПОВІТРЯ.....127

Дуба І.Е., Беглов К.В.

МОДЕЛЮВАННЯ ВОДОГРІЙНИХ КОТЛІВ ПРИ ГЛИБОКИХ ЗБУРЕННЯХ
ЗА ТЕПЛОТВОРНОЮ СПРОМОЖНІСТЮ ПАЛИВА.....132

Дубко В.А.

ПЕРВЫЕ ИНТЕГРАЛЫ УРАВНЕНИЙ ИТО СО СЛУЧАЙНЫМИ КОЭФФИЦИЕНТАМИ
И РАСШИРЕННОЙ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ ИТО137

Ермаков И.А., Ложечников В.Ф.

УСОВЕРШЕНСТВОВАННЯ СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ
УРОВНЯ ВОДЫ С СИГНАЛОМ ПО РАЗНИЦЕ ТЕМПЕРАТУР В УСТАНОВКЕ
ГЕНЕРИРОВАНИЯ ПАРА ЭНЕРГОБЛОКА ВВЭР-1000 АЭС.....142

Жученко О.А., Хібеба М.Г.

МОДЕЛЬ ФОРМУВАННЯ ВУГЛЕЦЕВИХ ВИРОБІВ У РЕЖИМАХ ПІДГОТОВКИ ТА ПРЕСУВАННЯ....149

Кириленко М.В. РОЗРАХУНОК ОПТИМАЛЬНИХ НАСТРОЮВАНЬ РЕГУЛЯТОРА РОЗРІДЖЕННЯ В ТОПКОВІЙ КАМЕРІ.....	157
Киричек Г.Г., Рудьковський О.Р., Тимошенко В.С. ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНА СИСТЕМА ПІДТРИМКИ ОБЧИСЛЕНЬ.....	161
Киселёва Н.И., Погребной Я.С., Беглов К.В. РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ МОЩНОСТИ ЭНЕРГОБЛОКА АЭС С ВВЭР-1000 В РЕЖИМЕ Н.....	167
Киселёва Н.И., Погребной Я.С., Беглов К.В. РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ МОЩНОСТИ ЭНЕРГОБЛОКА АЭС С ВВЭР-1000 В РЕЖИМЕ Т.....	171
Климчук В.О., Корнага Я.І. ИНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА РОЗПІЗНАВАННЯ ЕМОЦІЙ ЛЮДИНИ НА ВІДЕО ЗА ДОПОМОГОЮ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ.....	175
Конущбаева Т.В., Беглов К.В. АСР ПОТУЖНОСТІ ЕНЕРГОБЛОКА АЕС З ВВЕР-1000 ЗА УТРИМАННЯ СЕРЕДНЬОЇ ТЕМПЕРАТУРИ ПЕРШОГО КОНТУРУ ПОСТІЙНОЮ.....	179
Лютенко Ю.М., Ложечникова Н.В. УДОСКОНАЛЕНА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ТЕПЛОВИМ НАВАНТАЖЕННЯМ БАРАБАННОГО КОТЛА ДЛЯ СПАЛЮВАННЯ ГОРЮЧИХ КИСНЕВМІСНИХ ВУГЛЕВОДНЕВИХ ГАЗІВ.....	184
Мастикаш О.В. МОДЕЛЬ СОЦІАЛЬНОГО СЕРЕДОВИЩА ІНТЕРНЕТУ.....	190
Муренко В.В., Дьяков С.О. CRM-СИСТЕМА ПРОДАЖУ ТА КУПІВЛІ РЕКЛАМНИХ ПОВІДОМЛЕНЬ У “TELEGRAM”.....	196
Павленко В.Д., Ломовий В.І. ПОБУДОВА АПРОКСИМАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ НЕЛІНІЙНОЇ ДИНАМІЧНОЇ СИСТЕМИ У ВИГЛЯДІ ПОЛІНОМА ВОЛЬТЕРРА.....	200
Пасєка М.С. СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ ХМАРНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ДЛЯ РОЗРОБКИ ПРОГРАМНИХ ДОДАТКІВ.....	206
Петросян А.А., Давидов В.О. АВТОМАТИЧНА СИСТЕМА РЕГУЛЮВАННЯ ЕКОНОМІЧНОСТІ ПАРОВОГО КОТЛА ГМ-50.....	212
Повхан І.Ф. ПРОБЛЕМА ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ ОЦІНКИ НАВЧАЛЬНОЇ ВИБІРКИ В ЗАДАЧАХ РОЗПІЗНАВАННЯ ДИСКРЕТНИХ ОБ’ЄКТІВ.....	217
Портянко Т.М. ПРАКТИЧНИЙ ПІДХІД ДО ФОРМУВАННЯ ВАЛІДАЦІЙНОГО МАЙСТЕР-ПЛАНУ В ПРОЦЕСІ ВАЛІДАЦІЇ КОМП’ЮТЕРИЗОВАНИХ СИСТЕМ.....	222
Портянко Т.М., Кучеренко В.С. ОСОБЛИВОСТІ УПРАВЛІННЯ РИЗИКАМИ У ПРОЦЕСІ ВПРОВАДЖЕННЯ КОМП’ЮТЕРИЗОВАНИХ СИСТЕМ НА ФАРМАЦЕВТИЧНИХ ПІДПРИЄМСТВАХ.....	228

CONTENTS

APPLIED GEOMETRY, ENGINEERING GRAPHICS AND ERGONOMICS

Danova K.V.

ASSESSMENT OF SENSORY LIMITATIONS OF PERSONS
WITH DISABILITY IN THE WORK SAFETY ASPECTS1

MACHINE SCIENCE

Martynenko V.H., Lvov G.I.

A NUMERICAL-EXPERIMENTAL PROCEDURE FOR DETERMINING
THE EFFECTIVE CHARACTERISTICS AND STRENGTH OF REINFORCED COMPOSITE7

Polishchuk M.N.

OPTIMIZATION OF THE PARAMETERS OF THE MOBILE ROBOT
WITH GAS GENERATOR OF ENERGY15

Rudik AV., Vengegha V.I.

EFFECTIVE GRINDING OF ROTATION SURFACES BY THE CONTACT CONTROL.....22

MATERIAL PROCESSING IN MECHANICAL ENGINEERING

Lavinsky D.V., Morachkovsky O.K.

THE DEFORMATION ANALYSIS OF STRUCTURES
FOR POWDER COMPACTION UNDER ELECTROMAGNETIC FIELD ACTION.....28

AIRCRAFT AND AEROSPACE TECHNIQUES

Yanchev S.V., Taku S.O.

DEVELOPMENT OF THE ADAPTIVE NEURAL NETWORK REGULATOR
OF THE INTELLIGENT CONTROL SYSTEM AVIATION ENGINE34

Olali N.V., Olali M.O., Orukari M., Jumbo E.E.

A MODEL OF COMPRESSOR BLADES CONTAMINATION IN AVIATION GTE IN OPERATION40

Shcherban A.P., Larin V.Y., Maslov V.P., Kachur N.V.

METHOD FOR CHECKING A LITHIUM-POLYMER BATTERY FOR UNMANNED AIRCRAFT48

ELECTRICAL ENGINEERING

Golubeva S.M., Morneva M.O., Toropov A.S.

COMPARATIVE ASSESSMENT OF GRAPHIC MODELING SYSTEMS
AND DESIGN AUTOMATION PRINCIPLES WHEN USING ENGINEERING PROFESSIONS
BY UNIVERSITY UNDERGRADUATES.....53

Kyrychenko O.S., Biljuk I.S., Shareyko D.Y., Fomenko A.M., Gavrilov O.S., Bugrim L.I.

NUMERICAL THREE-DIMENSIONAL MODELING OF THERMOELECTRIC COOLER
FOR MEASUREMENT ELECTRICAL EQUIPMENT OF AUTOMATIC SYSTEMS.....58

Kovalenko M.A., Maliar I.V.

EXPERIMENTAL STAND FOR THE INVESTIGATION
OF AN INDUCTION MOTOR WITH A SQUIRREL-CAGE ROTOR.....64

RADIO ENGINEERING AND TELECOMMUNICATIONS

Lysenko O.I., Novikov V.I., Petrova V.M., Guida O.G.

PROCEDURE FOR FORMATION THE ENERGY-SAVING LAYOUT TOPOLOGY
OF THE WIRELESS SENSOR CIRCUIT MONITORING OF THE TARGETS.....69

INFORMATICS, COMPUTER ENGINEERING AND AUTOMATION

Androschuk A.V., Pelykh S.N.

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF THE AUTOMATIC CONTROL SYSTEM OF THE PROPERTIES OF THE NUCLEAR FUEL VVER-1000 FOR THE PROGRAM CONTROL THE POWER OF THE REACTOR WITH A CONSTANT AVERAGE COOLANT TEMPERATURE.....73

Biriak V.V.

PURPOSE OF CPS EQUIPMENT. MODES OF OPERATION OF CPS FUNCTIONAL SYSTEMS. THE MODEL OF EFFICIENCY OF THE CPS REGULATORY GROUP AT ZAPORIZHIA NPP79

Blanar P.G., Ulitska E.O.

DESIGN OF THE AUTOMATIC CONTROL SYSTEM OF COMBINED HEAT AND POWER PLANT THERMAL ENERGY GENERATION CIRCUIT85

Boyko O.V., Pelykh S.N.

DEVELOPMENT AND INVESTIGATION OF THE AUTOMATED SYSTEM OF CONTROL OF VVER-1000 NUCLEAR FUEL PROPERTIES FOR THE PROGRAM OF REGULATION OF POWER OF A REACTOR WITH THE CONTINUOUS TISSUE OF SECONDARY CIRCUIT.....91

Borodkina I.L., Borodkin H.O.

INFORMATION SUPPORT FOR MARKETING ACTIVITIES ON THE MARKET OF VETERINARY PRODUCTS97

Verbitsky V.H., Polyakova N.P., Tatievskiy D.M.

RESEARCHING OF A POSSIBILITY TO IMPLEMENT CONTROLLED ROAD TRAIN MOVEMENT ALONG A PROGRAM CURVE.....103

Vlasyuk A.P., Zhukovska N.A., Zhukovskyy V.V., Shendera I.M.

MATHEMATICAL AND COMPUTER MODELLING OF THREE-DIMENSIONAL DEFORMATION PROCESSES OF SOIL MASSIF UNDER HEAT AND MASS TRANSFER AND COMMUNICATION FORCES EFFECT111

Vovk I.V., Beglov K.V.

MODELING OF WATER BOILERS IN FUEL CONTAMINATED FLUID FUELS.....116

Vodka O.O., Panarina O.D.

DEVELOPMENT OF METHODS OF COMPUTER SYNTHESIS AND ANALYSIS OF THE CHARACTERISTICS OF MATERIALS OF INHOMOGENEOUS STRUCTURE122

Dmytryshyn S.S., Davidov V.O.

ENHANCEMENT OF THE EFFICIENCY OF BURNING CARBOHYDRATED GASES IN POROGENERATOR INSTALLATIONS AT THE RATES OF REFRACTION OF THE FUEL / AIR127

Duba I.E., Beglov K.V.

MODELING OF WATER-HEATING BOILERS UNDER DEEP PERTURBENCES ON THE HEATING CAPACITY OF FUEL132

Doobko V.A.

THE FIRST INTEGRALS OF THE ITO EQUATIONS WITH RANDOM COEFFICIENTS AND OF THE EXTENDED SYSTEM OF ITO EQUATIONS137

Yermakov I.A., Lozhechnikov V.F.

UPGRADED SYSTEM OF AUTOMATION CONTROL OF THE WATER LEVEL WITH SIGNAL OF THE TEMPERATURE DIFFERENCE IN THE INSTALLATION OF STEAM GENERATION AT POWER UNIT IN VVER-1000 OF NPP.....142

Zhuchenko O.A., Khibeba M.G.

MODEL OF CARBON PRODUCTS FORMING IN PREPARATION AND PRESSING MODES149

Kyrylenko M.V. CALCULATION OF OPTIMUM SETTINGS OF THE REGULATOR OF THE VACUUM IN A CHAMBER	160
Kirichek G.G., Rudkovsky O.R., Timoshenko V.C. DECENTRALIZED SYSTEM OF THE SUPPORT COMPUTATIONS	166
Kiselova N.I., Pogrebniy Y.S., Beglov K.V. DEVELOPMENT OF AUTOMATIC SYSTEM FOR REGULATING THE POWER OF THE POWER UNIT OF THE WWER-1000 NPP IN THE MODE N	170
Kiselova N.I., Pogrebniy Y.S., Beglov K.V. DEVELOPMENT OF AUTOMATIC SYSTEM FOR REGULATING THE POWER OF THE POWER UNIT OF THE WWER-1000 NPP IN THE MODE T.....	174
Klymchuk V.O., Kornaha Ya.I. INTELLECTUAL SYSTEM OF RECOGNITION OF HUMAN EMOTIONS BY NEURAL NETWORK	178
Konushbaeva T.V., Beglov K.V. ASR POWER PERFORMANCE OF NPP NPV WITH WWER-1000 UNDER STORAGE OF THE SECOND TEMPERATURE OF THE FIRST CONTROL PERMANENT	183
Lyutenko J.M., Lozhechnikova N.V. IMPROVED CONTROL SYSTEM OF THERMAL LOAD OF THE STEAM BOILER FOR THE COMBUSTION OF COMBUSTIBLE OXYGEN CONTAINING HYDROCARBON GASES	189
Mastykash O.V. MODEL OF SOCIAL ENVIRONMENT OF THE INTERNET.....	195
Murenko V.V., Diakov S.O. CRM SYSTEM OF SALE AND PURCHASE OF ADVERTISING MESSAGES IN “TELEGRAM”	199
Pavlenko V.D., Lomovoy V.I. CONSTRUCTION OF THE MODEL OF APPROXIMATION NONLINEAR DYNAMIC SYSTEM IN THE FORM VOLTERRA POLYNOMIAL.....	205
Pasyeka M.S. SYSTEM ANALYSIS OF CLOUD TECHNOLOGY FOR THE DEVELOPMENT OF SOFTWARE APPLICATIONS.....	211
Petrosyan A.A., Davidov V.O. AUTOMATIC SYSTEM OF REGULATION OF ECONOMY OF THE GAM-50 COUPLING BOILER	216
Povkhan I.F. THE PROBLEM OF FUNCTIONAL ASSESSMENT OF THE TRAINING SET IN THE TASKS OF RECOGNITION OF DISCRETE OBJECTS.....	221
Portianko T.M. PRACTICAL APPROACH TO THE FORMATION OF THE VALIDATION MASTER PLAN IN THE PROCESS OF VALIDATION OF COMPUTERIZED SYSTEMS	227
Portianko T.M., Kucherenko V.S. FEATURES OF RISK MANAGEMENT IN IMPLEMENTATION OF COMPUTERIZED SYSTEM AT PHARMACEUTICAL ENTERPRISES	233

ПРИКЛАДНА ГЕОМЕТРІЯ, ІНЖЕНЕРНА ГРАФІКА ТА ЕРГОНОМІКА

УДК 614.8:331.44:331.421:331.582.2

Данова К.В.

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова

ОЦІНКА СЕНСОРНИХ ОБМЕЖЕНЬ ОСІБ З ІНВАЛІДНІСТЮ В АСПЕКТІ БЕЗПЕКИ ПРАЦІ

У статті розглянуто проблему впливу сенсорних обмежень людини на професійну діяльність та безпеку. Встановлено, що зорова та слухова характеристики сенсорної системи найбільшою мірою впливають на її здатність реагувати на небезпеку оточуючого середовища. Функціональні порушення цих систем можуть призвести до нещасного випадку чи аварії. Тому врахування функціональної здатності сенсорної системи людини під час виконання трудових обов'язків дає змогу попередити зростання рівня виробничого травматизму. Середньозважений показник сенсорної функціональної здатності надає змогу охарактеризувати здатність людини-оператора ефективно та безпечно виконувати професійну діяльність в умовах підприємства.

Ключові слова: сенсорна система, безпека, робоче місце, гострота зору, слух, працездатність, обмеження.

Постановка проблеми. У системі «людина – машина» функціональні характеристики сенсорної системи оператора безпосередньо впливають як на ефективність виконання виробничих завдань, так і на рівень безпеки виробничого процесу. Належний рівень функціонування сенсорної системи людини дає змогу не лише безпечно виконувати виробничі завдання, але й своєчасно реагувати на небезпеку, що може виникнути в оточуючому середовищі.

Сенсорна система людини представлена функціональними поєднаннями п'ятих інформаційних каналів: зорового, слухового, тактильного, смакового та нюхового. Їх комплексна дія дає людині змогу отримувати інформацію про навколишній світ та формувати уявлення про об'єкти оточення.

В умовах виробництва на більшості робочих місць інформаційні потоки, що надходять операторові, спрямовані за трьома основними каналами: зоровим, слуховим та тактильним.

Зорова функція є основним механізмом отримання інформації про середовище, що оточує людину. За різними даними, близько 80–90% інформації надходить саме через канали зорового аналізатора, тому важливість належного рівня його функціонування складно переоцінити.

З огляду на здатність людини-оператора ефективно та безпечно виконувати виробничі завдання, важливим інформаційним каналом також є слуховий аналізатор. Із його допомогою людина в змозі

не лише сприймати голосові повідомлення й реалізувати свою комунікативну функцію, але й реагувати на акустичні сигнали, що подаються у разі виникнення аварійної ситуації.

Таким чином, зорова та слухова функції людини є надзвичайно важливими як з погляду ефективного виконання трудової діяльності, так і в аспекті забезпечення безпеки на робочих місцях.

У разі обмеження функціональних можливостей людини щодо сприймання зорової та слухової інформації проблема безпечного виконання професійних обов'язків в умовах підприємства ускладнюється, оскільки роботодавець має впроваджувати посилені заходи з організації безпеки працівників.

У теперішній час внаслідок зростання рівня загальної захворюваності населення, а також збільшення навантаження на зоровий та слуховий аналізатор на фоні стрімкого розвитку інформаційних й акустичних технологій, проблема погіршення зорової та слухової функцій населення України є актуальною. Статистичні дані стосовно захворюваності населення вказують на те, що кількість уперше зареєстрованих захворювань ока та вуха стабільно залишаються на високому рівні (рис. 1).

З наведених на рис. 1 статистичних даних видно, що щороку в Україні виявляються нові випадки захворювань ока у близько 1,4 млн осіб, та вперше реєструються захворювання вуха

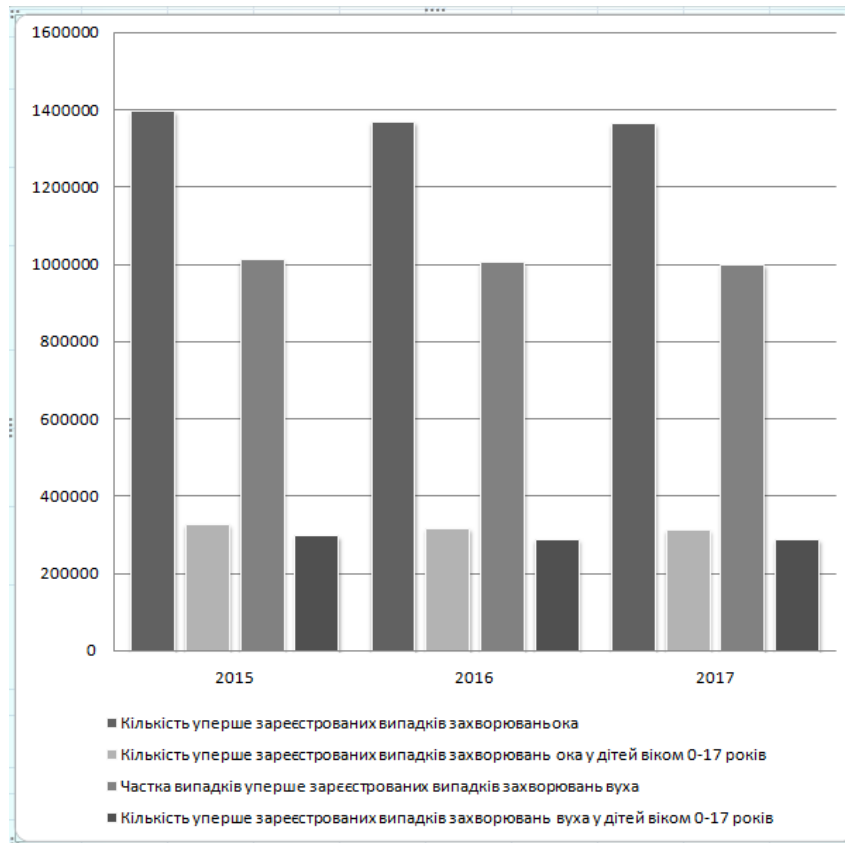


Рис. 1. Статистичні дані щодо кількості випадків захворювань ока та вуха в Україні [1]

у приблизно 1 млн осіб дорослого віку. Якщо додати до цих показників чисельність осіб, які мають хронічні захворювання, вроджені вади ока та вуха, стає зрозумілим, що врахування сенсорних обмежень у діяльності працівників є важливим завданням з огляду на забезпечення їх безпечного перебування на робочому місці та території підприємства.

Тобто створення інклюзивного виробничого середовища, де враховано особливі потреби працівників із вадами здоров'я, має ґрунтуватися не лише на врахуванні фізичних особливостей осіб з інвалідністю, але й на оцінці функціональної здатності сенсорної системи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблема забезпечення інклюзивного середовища для осіб із вадами здоров'я останніми роками набуває дедалі більшої актуальності. Підписання Україною у 2014 р. Угоди про асоціацію з країнами ЄС [2] сприяло активізації дій щодо адаптації вітчизняного законодавства до європейського. Це, насамперед, стосується питань захисту прав людини, зокрема з особливими потребами.

Закон України «Про охорону праці» [3], дія якого поширюється на усіх юридичних та фізич-

них осіб, що використовують найману працю, незалежно від виду економічної діяльності, визначає основні пріоритети державної політики у галузі безпеки праці. Так, зокрема, у Законі [3] зазначено, що соціальний захист працівників та адаптація трудових процесів під можливості людини з урахуванням стану здоров'я є базовим принципом, на якому ґрунтується державна політика у галузі охорони праці.

Ст. 12 Закону зобов'язує підприємства, що використовують працю осіб з інвалідністю, створювати для них безпечні умови праці з урахуванням рекомендацій медико-соціальної експертної комісії та індивідуальних програм реабілітації, а також вживати усіх необхідних заходів безпеки праці, які відповідають специфічним особливостям цієї категорії працівників [3].

Таким чином, законодавство вимагає створення інклюзивного виробничого середовища, яке має враховувати можливості та обмеження людини з інвалідністю.

Особливу важливість при цьому мають саме сенсорні функції, оскільки вони виконують першочергову роль у забезпеченні безпеки людини, що є вкрай важливим в умовах виробництва.

Проблема впливу на життєдіяльність людини сенсорних функціональних порушень досліджується у роботах багатьох вчених. Значною мірою вони присвячені вивченню питань, пов'язаних із сенсорними обмеженнями у дітей, оскільки за наявності суттєвих функціональних порушень сенсорної системи дитина потребує створення спеціального інклюзивного освітнього та побутового середовища задля надання їй можливості розвитку.

Для осіб працездатного віку оцінка сенсорних можливостей переважно розглядається в аспекті професійного відбору працівників, посади яких внесено до Переліку робіт, де є потреба у професійному доборі [4], та Переліку робіт з підвищеною небезпекою [5], оскільки від цього залежить безпека як самих працівників, так й інших працівників, а також виробничого обладнання. Однак не лише аспектом професійного відбору обмежується ця проблема.

Роботодавець, приймаючи на роботу особу з інвалідністю, а саме – з обмеженими сенсорними можливостями, має не лише оцінити потенційну працездатність людини, але й визначити необхідні заходи із забезпечення її безпеки й оцінити їх достатність із метою попередження зростання рівня виробничого травматизму. Це є значною перепорою на шляху до підвищення ефективності працевлаштування осіб з інвалідністю [6].

Постановка завдання. Важливе завдання, що має бути вирішено з метою підвищення ефективності професійної інтеграції осіб з інвалідністю та створення інклюзивного виробничого середовища, – це розробка підходів до оцінки функціонального стану людини з інвалідністю, зокрема із вадами функціонування сенсорної системи, в умовах виробництва. Це дасть змогу оптимізувати процес підбору робочого місця та

врахувати професійні можливості працівника задля підвищення рівня його працездатності та безпеки в умовах підприємства.

Виклад основного матеріалу дослідження. Зорова функція людини розглядається як поєднання таких функцій: центрального, периферичного, бінокулярного зору, а також функції сприйняття кольору, світла та темряви [7].

Основне функціональне значення має центральний зір, оскільки саме він виконує провідну роль у виявленні певних об'єктів з оточуючого середовища. Основною характеристикою його роботи є гострота зору.

Гострота зору є одним із найбільш важливих показників роботи зорового аналізатору, оскільки зумовлює здатність людини точно сприймати інформацію центральним зором.

Гострота зору характеризується через здатність сприймати окремо дві крапки, які знаходяться на мінімальній відстані одна від одної [9]. У нормативних документах, які характеризують ступінь ушкодження організму людини, наприклад, цей показник використовується для визначення ступеня ушкодження загалом усього зорового аналізатору [10; 11].

Для оцінки ступеня порушення функції зорового аналізатора використовуються критерії, зазначені у табл. 1. Обмеження життєдіяльності, що викликаються порушеннями функцій зорового аналізатора людини, зазначені у табл. 2.

Неврахування цих обмежень під час вибору робочого місця та виробничих навантажень на працівника із вадами зору може призвести до небажаних наслідків у вигляді травматизму. Причому внаслідок спотворення певної інформації, порушення орієнтації у просторі та з інших причин постраждати може як сам працівник, так й інші працівники, а також майно підприємства.

Таблиця 1

Критерії визначення ступеня порушення функції зорового аналізатора [8]

Функції	Ступінь порушення функцій		
	I (середній ступінь слабкості)	II (високий ступінь слабкості)	III (практична чи абсолютна сліпота)
Гострота зору монокулярного ока чи ока, яке найкраще бачить, з корекцією	0,1–0,3	0,09–0,05	0,04–0
Поле зору: периферичні межі по меридіану від точки фіксації	ширше ніж 20°	10° – 20°	10°–0°
Зорова працездатність	помірне зниження	виражене зниження	значно виражене зниження – відсутність

Ступінь порушення основних функцій людини за критеріями життєдіяльності залежно від рівня слабкозорості [8]

Категорії обмеження життєдіяльності, u_p	Ступінь порушення основних функцій		
	I (середній ступінь слабкозорості)	II (високий ступінь слабкозорості)	III (практична чи абсолютна сліпота)
Самообслуговування, u_1	1	2	3
Самостійне пересування, u_2	1	2	3
Орієнтація, u_3	1	1,2	2
Спілкування, u_4	1	2	2
Контроль своєї поведінки, u_5	Не порушений		
Здатність до навчання, u_6	1,2	2	2
Здатність до трудової діяльності, u_7	1	2	2

Таблиця 3

Ступені функціонального порушення слухового аналізатора [12]

Ступінь приглухуватості	Тональні пороги, дБ	Шепітна річ, м	Розмовна річ, м
I	20–40	1,5–2	3–6
II	40–60	ad concham	≤ 3
III	60–80	0	ad concham
IV	>	0	Крик ad concham

Порушення слухової функції, що характеризуються втратою слуху, можуть бути вродженими та набутими. Проблеми у надходженні акустичних сигналів до головного мозку зумовлюються порушеннями кондуктивного чи нейросенсорного типу. Ступені порушення слухової функції наведено у табл. 3.

За наявності стійких функціональних порушень слухового аналізатора людина може отримати інвалідність III групи (наприклад, при двобічній глухоті), в окремих випадках – II. Тобто втрата слуху меншою мірою, ніж втрата зору, призводить до обмеження життєдіяльності. Однак, як окремо, так і одночасно, сенсорні функціональні обмеження становлять значну небезпеку для людини.

Таким чином, наявні у працівника обмеження життєдіяльності, що викликані функціональними порушеннями сенсорної системи, мають враховуватися під час підбору та адаптації робочого місця. Організацію території підприємства, виробничих приміщень, технологічного процесу необхідно здійснювати з урахуванням сенсорних функціональних обмежень працівників з інвалідністю.

Для оцінки професійного потенціалу працівника та визначення ступеня наявних обмежень

життєдіяльності в аспекті сприймання інформації з метою подальшої розробки адаптаційних рішень доцільно застосовувати одночисловий критерій, в основу розробки якого покладено принцип розподілу інформації: 90% інформації отримується зоровим аналізатором, 9% – слуховим, 1% – тактильним [13–14]. Інші аналізатори майже не задіяні у виконанні більшості виробничих завдань.

Враховуючи приблизний розподіл часток інформаційного потоку через сенсорні канали людини, охарактеризуємо здатність людини використовувати сенсорну систему як середньозважений показник сенсорної функціональної здатності людини D

$$D = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i d_i, \quad (1)$$

де d_i – показник функціональної здатності i -ї сенсорної функції людини;

a_i – ваговий коефіцієнт;

n – кількість сенсорних функцій, що розглядаються.

Для людини, яка не має вад у функціонуванні сенсорної системи організму, середньозважений показник сенсорної функціональної здатності буде характеризуватися виразом

$$D = 0,3d_1 + 0,03d_2 + 0,003d_3, \quad (2)$$

де d_1 – показник функціональної здатності зорової функції;

d_2 – показник функціональної здатності слухової функції;

d_3 – показник функціональної здатності тактильної функції.

Показник функціональної здатності i -ї сенсорної системи людини d_i може бути охарактеризований кількістю сигналів певного виду, які мають оброблятися оператором за допомогою певної сенсорної функції.

Результати оцінки сенсорної функціональної здатності за різних ступенів порушень наведено

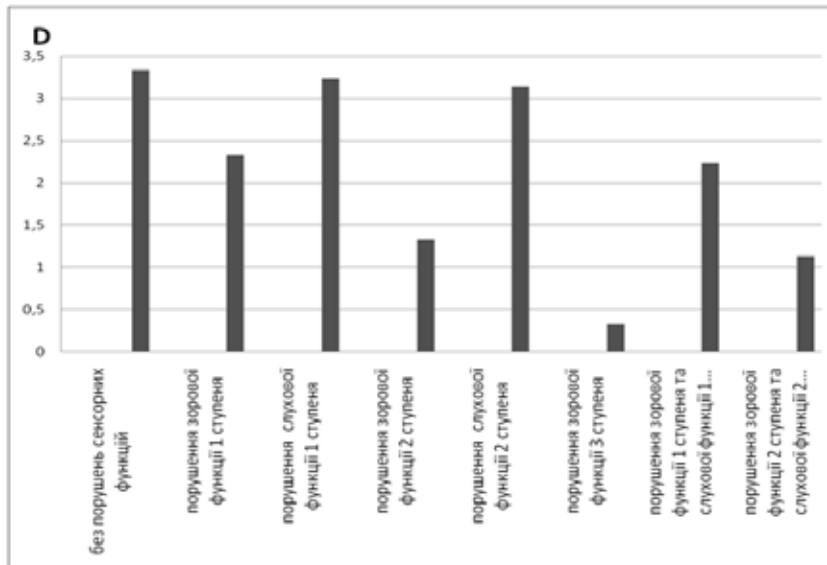


Рис. 2. Результати оцінки рівня працездатності працівника за середньозваженим показником сенсорної функціональної здатності

на рис. 2. Середньозважений показник сенсорної функціональної здатності D дає змогу у формі, зручній для роботодавця чи фахівця немедичного профілю, зрозуміти особливі потреби працівника з інвалідністю та розробити необхідні ергономічні та інші організаційно-технічні заходи.

Висновки. Для умов виробництва важливо, щоб сенсорна система людини-оператора давала змогу ефективно та безпечно виконувати виробничі завдання. Функціональний стан сенсорної системи має відповідати як трудовому навантаженню, так і можливим змінам у виробничій обстановці з метою попередження виникнення виробничого травматизму. У разі порушення

функціонального стану зорового аналізатора ризик отримання працівником травми суттєво зростає.

Попередження реалізації небезпеки можливе за умови дослідження особливостей сенсорної роботи людини з вадами здоров'я та надання подальших рекомендацій щодо підбору робочого місця та обсягу виробничого навантаження. Використання одночислового середньозваженого показника сенсорної функціональної здатності дає змогу спростити процес прийняття рішення по вибору робочого місця та подальшій його адаптації з метою підвищення рівня ефективності та безпеки праці.

Список літератури:

1. Заклади охорони здоров'я та захворюваність населення України у 2017 р. URL: <http://www.ukrstat.gov.ua/> (дата звернення: 13.11.2018).
2. Угода про асоціацію між Україною, з однієї сторони, та Європейським Союзом, Європейським співтовариством з атомної енергії і їхніми державами-членами, з іншої сторони: Закон України від 16 вересня 2014 р. № 1678-VII. URL: http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_011 (дата звернення: 03.10.2018).
3. Про охорону праці: Закон України від 14 жовтня 1992 р. № 2694-XII. URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/2694-12> (дата звернення: 16.07.2018).
4. Про затвердження Переліку робіт, де є потреба у професійному доборі: Наказ Міністерства охорони здоров'я України від 23 вересня 1994 р. № 263/121. URL: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0018-95> (дата звернення: 03.11.2018).
5. Перелік робіт із підвищеною небезпекою: Наказ Держнаглядохоронпраці України від 26 січня 2005 р. № 15. URL: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0232-05> (дата звернення: 03.11.2018).
6. Данова К.В., Малишева В.В. Аналіз працездатності осіб із обмеженнями життєдіяльності в контексті безпеки праці. Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського (Серія: Технічні науки). 2018. Том 29(68) № 4, ч. 1. С. 1–6.
7. Шевчук В.Г. Фізіологія: підручник для ВМНЗ IV р.а. 2-ге видання. Вінниця, 2015. 448 с.
8. Современная офтальмология: руководство для врачей / под ред. В.Ф. Даниличева. СПб.: Издательство «Питер», 2000. 672 с.

9. Безкоровайна І.М., Ряднова В.В., Воскресенська Л.К. Офтальмологія: навч. пос. для студентів вищих медичних закладів III–IV рівнів акредитації. Полтава, 2012. 248 с.

10. Про затвердження інструкції про встановлення груп інвалідності: Наказ Міністерства охорони здоров'я України від 5 вересня 2011 р. № 561. URL: <http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/z1295-11> (дата звернення: 03.10.2018).

11. Критерії встановлення ступеня стійкої втрати професійної працездатності у відсотках працівникам, яким заподіяно ушкодження здоров'я, пов'язане з виконанням трудових обов'язків: Наказ Міністерства охорони здоров'я України від 5 червня 2012 р. № 420. URL: <http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/z1388-12/print1509621305793323> (дата звернення: 03.10.2018).

12. Солдатов И.Б., Гофман В.Р. Оториноларингология: учебник / под ред. ак. РАМН проф. И.Б. Солдатова, проф. В.Р. Гофмана. СПб.: ЭЛБИ, 2001. 472 с.

13. Адамчук В.В., Варна Т.П., Воротникова В.В. Эргономика: уч. пособие / под ред. В.В. Адамчука. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2012. 254 с.

14. Шибанов Г.П. Количественная оценка деятельности человека в системе человек-техника. М.: Машиностроение, 1983. 263 с.

ОЦЕНКА СЕНСОРНЫХ ОГРАНИЧЕНИЙ ЛИЦ С ОГРАНИЧЕННЫМИ ВОЗМОЖНОСТЯМИ В АСПЕКТЕ БЕЗОПАСНОСТИ ТРУДА

В статье рассмотрена проблема влияния сенсорных ограничений человека на профессиональную деятельность и безопасность. Установлено, что зрительная и слуховая характеристики сенсорной системы в наибольшей степени влияют на ее способность реагировать на опасности окружающей среды. Функциональные нарушения этих систем могут привести к несчастному случаю или аварии. Поэтому учет функциональной способности сенсорной системы человека при выполнении трудовых обязанностей позволяет предупредить рост уровня производственного травматизма. Средневзвешенный показатель сенсорной функциональной способности дает возможность охарактеризовать способность человека-оператора эффективно и безопасно выполнять профессиональную деятельность в условиях предприятия.

Ключевые слова: сенсорная система, безопасность, рабочее место, острота зрения, слух, работоспособность, ограничения.

ASSESSMENT OF SENSORY LIMITATIONS OF PERSONS WITH DISABILITY IN THE WORK SAFETY ASPECTS

The article considers the problem of the influence of human sensory restrictions on professional activity and safety. It is established that the visual and auditory characteristics of sensory system to a considerable degree affect on its ability to respond to environmental hazards. Functional disorders of these systems can lead to an accident. Therefore accounting the functional ability of the human sensory system in the execution of work duties can prevent an increase of the level of occupational injuries. The weighted average of the sensory functional capacity makes it possible to characterize the ability of a human-operator to perform his professional activities in an enterprise effectively and safely.

Key words: sensory system, safety, work place, visual acuity, hearing, capacity for work, restrictions.

МАШИНОЗНАВСТВО

УДК 620.172.2

Мартиненко В.Г.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Львов Г.І.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

ЧИСЕЛЬНО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПРОЦЕДУРА ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТА МІЦНОСТІ АРМОВАНОГО КОМПОЗИТА¹

У роботі описане чисельно-експериментальне дослідження ефективних пружних характеристик та миттєвої міцності полімерного армованого композиційного матеріалу із тканюю структурою армування. Воно базується на проведенні експериментів на розтягування зразків, вирізаних із композитної пластини під різними кутами до напрямків армування, із подальшою аналітичною обробкою результатів. Для уточнення отримуваних експериментальних даних була побудована скінченно-елементна розрахункова модель композиційного зразка в захватах із орієнтацією волокон під різними кутами до докладеного навантаження. Такий комплексний підхід дав змогу отримати за кімнатної та підвищеної температур технічні константи композиційного матеріалу в площині, а також визначити параметри його міцності у навантаженні у різних напрямках. Наведене дослідження розширює відомі дані про фізико-механічні властивості полімерних армованих композиційних матеріалів та дає змогу оцінити особливості їхньої анізотропії, викликані спрямованою структурою армування композиту.

Ключові слова: анізотропія, композиційний матеріал, експериментальне дослідження, миттєва міцність, армування.

Постановка проблеми. Полімерні армовані композиційні матеріали (ПАКМ) використовуються в галузях автомобіле-, авіа- та космічного будівництва, у важкій промисловості та виробництві товарів загального споживання [1; 2].

Під час експлуатації композиційні елементи конструкцій та машин піддаються впливу підвищених температур та високих рівнів навантажень. Оскільки зазвичай вони є тонкостінними елементами, для підтримки їх працездатності важливо точно розрахувати їхню поведінку під впливом змінних температур та високих навантажень [3–5].

Таким чином, дослідження механічних властивостей композиційних матеріалів є актуальною на поточний момент задачею, оскільки моделювання механічної поведінки та визначення міцності композиційних елементів машин є вкрай важливим під час їх проектування.

Через наявність спрямованих армуючих волокон механічні властивості композиційних матеріалів є анізотропними. Внаслідок цього ефективні характеристики та міцність полімерних армованих композиційних матеріалів залежать від напрямку, що робить проблему їх визначення досить складною.

Наприклад, анізотропні пружні властивості та міцність ПАКМ різних типів детально досліджувалися в роботах [6–14]. Незважаючи на це, нині й досі бракує інформації щодо фізико-механічних властивостей композитів через велику кількість їхніх типів та форм.

Дослідження анізотропних властивостей ПАКМ є складною інженерною та науковою процедурою. Її розв'язання потребує виконання експериментів на розтягування композиційних зразків, вирізаних у різних напрямках, кількість яких залежить від ступеня анізотропії механічних властивостей та застосування складних аналітичних і чисельних моделей для коректної обробки експериментальних даних з метою адекватного відтворення таких властивостей. Саме такий комплексний підхід розглянутий у представленій роботі.

¹ Ця робота виконана за підтримки МОН України в рамках реалізації науково-дослідних робіт «Розробка методів математичного моделювання поведінки нових та композиційних матеріалів для оцінки ресурсу та прогнозування надійності елементів конструкцій» (№ ДР 0117U004969) та «Розробка математичних моделей та методів розв'язання нелінійних задач динаміки та міцності конструкцій із гомогенних та композиційних матеріалів» (№ ДР 0118U002045)»

1. Фізичні співвідношення плоского напруженого стану в композиті

Анізотропний пружний матеріал може бути відображений за допомогою тензорного співвідношення у покомпонентній формі:

$$\varepsilon_{ij} = S_{ijkl} \sigma_{kl}, \quad (1)$$

де $i, j, k, l = 1, 2, 3$; σ_{ij} та ε_{ij} – компоненти тензорів напружень і деформацій другого рангу відповідно; S_{ijkl} – компоненти тензора податливості четвертого рангу.

Якщо врахувати, що схема армування композиту, який розглядається, призводить до ортотропії механічних властивостей, то це дає змогу знизити число значимих компонент симетричного тензора податливості з 36 до 9. Тоді у формі Фойгта рівняння (1) запишеться таким чином:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{1111} & S_{1122} & S_{1133} & 0 & 0 & 0 \\ S_{1122} & S_{2222} & S_{2233} & 0 & 0 & 0 \\ S_{1133} & S_{2233} & S_{3333} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{2323} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{1313} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{1212} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{Bmatrix}. \quad (2)$$

З іншого боку, компоненти тензора податливості ортотропного матеріалу можуть бути виражені через технічні константи:

$$[S] = \begin{bmatrix} 1/E_1 & -\nu_{12}/E_1 & -\nu_{13}/E_1 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{21}/E_2 & 1/E_2 & -\nu_{23}/E_2 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{31}/E_3 & -\nu_{32}/E_3 & 1/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{23} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{13} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{12} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Шлях навантаження зразків дає змогу розглядати напружений стан у них плоским, що означає рівність нулю векторів напружень на поверхнях, паралельних до площини зразка, тобто

$$\sigma_{33}(t) = 0; \sigma_{23}(t) = 0; \sigma_{13}(t) = 0.$$

Тоді можуть використовуватись спрощені фізичні співвідношення:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{1111} & S_{1122} & 0 \\ S_{1122} & S_{2222} & 0 \\ 0 & 0 & S_{1212} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{Bmatrix}. \quad (4)$$

За допомогою проведення експериментів можуть бути отримані лише поздовжні переміщення та деформації. Тоді перший експеримент з розтягування зразків, вирізаних у першому напрямку армування, може дати компоненту тензора податливості $(S_{1111})_{0^\circ}$ у системі координат (СК), що співпадає із цим напрямком, другий експеримент з розтягування зразків, вирізаних у другому напрямку армування, дає компоненту $(S_{2222})_{0^\circ}$ у тій же СК, а третій експеримент дає змогу знайти компоненту $(S_{1111})_{45^\circ}$ у СК, повернутій на кут 45° до першого напрямку армування:

$$\begin{cases} (S_{1111})_{0^\circ} = (\varepsilon_{11})_{0^\circ} / P_1; \\ (S_{2222})_{0^\circ} = (\varepsilon_{22})_{0^\circ} / P_2; \\ (S_{1111})_{45^\circ} = (\varepsilon_{11})_{45^\circ} / P_3. \end{cases}, \quad (5)$$

де P_1, P_2, P_3 – це постійні розподілені навантаження, що докладаються до робочих частин зразків для першого, другого та третього типів експериментів відповідно; $(\varepsilon_{11})_{0^\circ}, (\varepsilon_{22})_{0^\circ}, (\varepsilon_{11})_{45^\circ}$ – деформації, виміряні для першого, другого та третього типів експериментів відповідно.

Інші компоненти тензора податливості не можуть бути знайдені без вимірювання додаткової інформації. Водночас відповідно до правил трансформації компонентів тензорів за повороту СК компонента $(S_{1111})_{45^\circ}$ може бути знайдена через компоненти в початковій СК [15]:

$$(S_{1111})_{45^\circ} = (S_{1111})_{0^\circ} \cos^4 \theta + (S_{2222})_{0^\circ} \sin^4 \theta + (2(S_{1122})_{0^\circ} + (S_{1212})_{0^\circ}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta, \quad (6)$$

де $\theta = 45^\circ$ – це кут повороту СК.

Після перебудови співвідношення (6) сума невідомих компонент може бути виражена таким чином:

$$2(S_{1122})_{0^\circ} + (S_{1212})_{0^\circ} = 4(S_{1111})_{45^\circ} - (S_{1111})_{0^\circ} - (S_{2222})_{0^\circ}. \quad (7)$$

Якщо порівняти (3) із (7), технічні константи мають вигляд:

$$\begin{cases} (E_1(t))_{0^\circ} = 1 / (S_{1111}(t))_{0^\circ}; \\ (E_2(t))_{0^\circ} = 1 / (S_{2222}(t))_{0^\circ}; \\ (E_1(t))_{45^\circ} = 1 / (S_{1111}(t))_{45^\circ}; \\ \frac{1}{(G_{12}(t))_{0^\circ}} - \frac{2(\nu_{12}(t))_{0^\circ}}{(E_1(t))_{0^\circ}} = \frac{4}{(E_1(t))_{45^\circ}} - \frac{1}{(E_1(t))_{0^\circ}} - \frac{1}{(E_2(t))_{0^\circ}}. \end{cases} \quad (8)$$

Четверте рівняння в системі містить у собі дві невідомі – $(G_{12})_{0^\circ}$ та $(\nu_{12})_{0^\circ}$, тому ця система не може бути розв’язана без використання додаткової інформації.

Проте в низці робіт [16–18] було встановлено, що значення коефіцієнта Пуассона в площині композита майже не відрізняються один від одного для різних зразків склопластику та у середньому їх можна прийняти на рівні 0.111.

Тоді у разі відомого значення коефіцієнта Пуассона $(\nu_{12})_{0^\circ}$ з четвертого рівняння в системі (8) може бути знайдено невідоме значення модуля зсуву $(G_{12})_{0^\circ}$ таким чином:

$$\frac{1}{(G_{12}(t))_{0^\circ}} = \frac{4}{(E_1(t))_{45^\circ}} - \frac{1 - 2(\nu_{12}(0))_{0^\circ}}{(E_1(t))_{0^\circ}} - \frac{1}{(E_2(t))_{0^\circ}}. \quad (9)$$

Таким чином може бути виконана обробка експериментальних даних для отримання повної інформації про ефективні властивості композиту в площині.

2. Підготовка зразків для проведення експерименту

Процедура розробленого методу експериментального дослідження анізотропних механічних

властивостей композиційного матеріалу та структура експериментальної установки описана в роботах [19–20].

Композиційний матеріал, що розглядається, є поєднанням епоксидної смоли з довгими скляними спрямованими волокнами [21, 22]. Схема ортогонального плетіння матеріалу забезпечує високі міцнісні властивості тонких оболонок, виготовлених з цього матеріалу, що піддаються силам розтягування або згину, зберігаючи його легку вагу (приблизно чверть порівняно із аналогічним значенням для сталі). Водночас цей композиційний матеріал не настільки міцний, як вуглепластик, через слабші механічні властивості скловолокна, але значно дешевший завдяки низькій ціні виробництва порівняно з вуглецевими волокнами.

Узагальнені механічні властивості епоксидної смоли та скляних волокон представлені у роботах [23; 24] та [25; 26] відповідно.

На рисунку 1 показана схема вирізання експериментальних зразків. Таким чином, кожен ряд зразків був нарізаний у власному напрямку з однієї великої пластини склопластику.

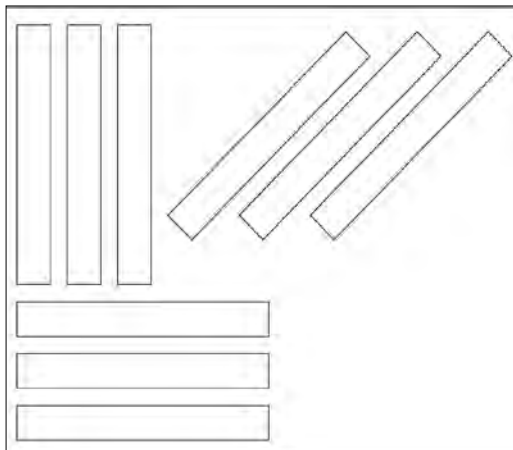


Рис. 1. Схема вирізання композиційних зразків

Підготовка зразків проводилась відповідно до стандарту Американського товариства випробувань матеріалів (American Society for Testing and Materials – ASTM) D618 [27]. Процедура A

вибрана як адекватна підготовка для поточних цілей тестування.

Геометрія зразків була розроблена відповідно до стандарту ASTM D638 [28]. На рисунку 2 зображено фотографію зразків товщиною 2 мм.

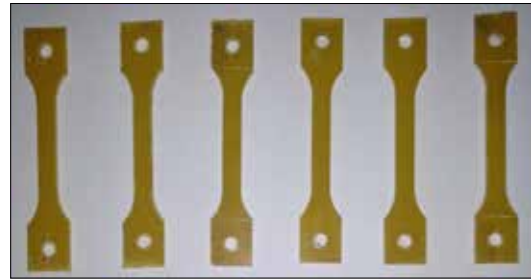


Рис. 2. Експериментальні зразки

У зразках містяться отвори діаметром 4 мм на кінцях, щоб забезпечити їх збірку в експериментальній машині. Після монтажу кінці зразків були затягнуті тримачами, щоб уникнути концентрації напружень навколо отворів і забезпечити повну фіксацію кінців зразка.

У зразках містяться отвори діаметром 4 мм на кінцях, щоб забезпечити їх збірку в експериментальній машині. Після монтажу кінці зразків були затягнуті тримачами, щоб уникнути концентрації напружень навколо отворів і забезпечити повну фіксацію кінців зразка.

3. Процедура проведення експериментального дослідження

Процедура та деталі набору експериментів були заплановані відповідно до стандартів ASTM [28; 29].

Зразки вирізані з однієї композиційної пластини товщиною 2 мм у напрямках 0°, 45° та 90°, що показано на рисунку 1. Зразки навантажуються у напрямку їх довшої сторони. Залежно від напрямку вирізання це призведе до одного з трьох станів, показаних на рис. 3.

Такі схеми навантаження дали змогу отримувати плоскі механічні властивості композиційного матеріалу. Визначення механічних властивостей у третьому напрямку (перпендикулярно до площини

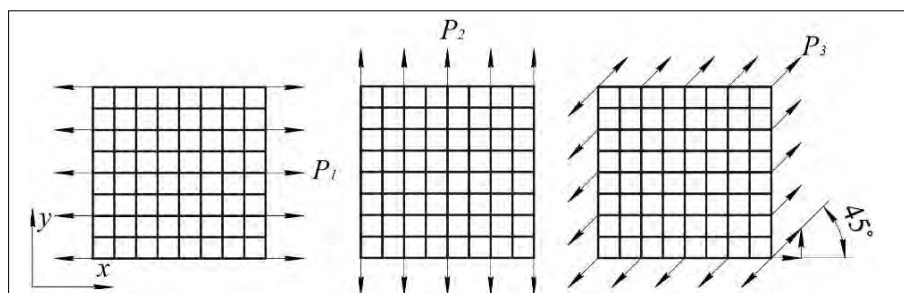


Рис. 3. Схема навантаження зразків

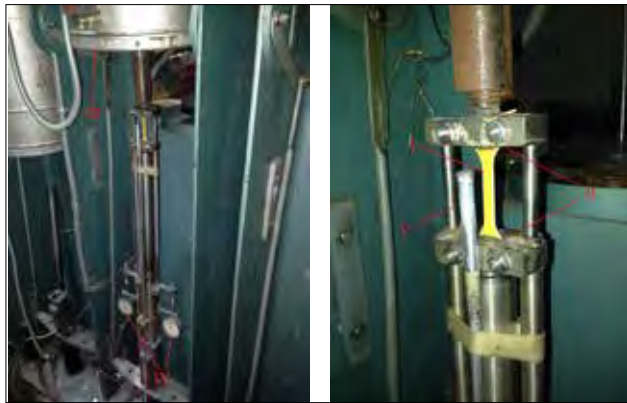


Рис. 4. Експериментальна машина: а) загальний вигляд; б) вигляд захватів

пластини) вимагає випробувань на розтягування або стискання в цих напрямках, які важко реалізувати. Проте у моделюванні механічної поведінки тонких композиційних пластин та оболонок, що піддаються силам розтягування та згинання, існує потреба лише у плоских властивостях.

На рисунку 4 показано повний вигляд експериментальної установки. Зразок І фіксується в захватах (тримачах) ІІ, тоді як автоматичний нагрівальний елемент ІІІ розташований навколо нього. Відносне переміщення захватів вимірюється двома датчиками ІV, а постійність температури контролюється датчиком V. Нагрівач забезпечує плавне підвищення температури до 100°C, підтримуючи її в межах не більше $\pm 2^\circ\text{C}$.

Правильність закріплення зразків та коректність навантаження засвідчується їхнім розривом у місцях робочої частини, як це показано на рис. 5 а та 5 б для зразків, вирізаних під 0° та 45° до першого напрямку армування відповідно. Навантаження зразків до розриву дало змогу побудувати діаграми розтягування композиту у різних напрямках.

4. Чисельне моделювання експериментів

Точне скінченно-елементне моделювання процедури проведення експерименту було необхідне для оцінки внеску деформацій зразків у захватах та поза їхніми робочими частинами в загальний рівень переміщень, що в процесі дослідження вимірюється на захватах, для встановлення переміщень робочої частини зразків. Оскільки напружено-деформований стан на кінцевих частинах зразків не є одновісним, то це має знизити точність вимірювань.

Розрахунки були проведені в ANSYS® Academic Research Mechanical, Release 17.2 [30], модуль Workbench. Механічні властивості

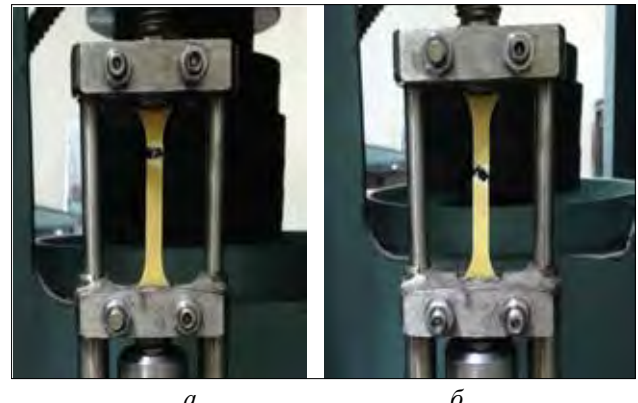


Рис. 5. Розрив зразків: а) зразок, вирізаний під кутом 0° до орієнтації волокон; б) зразок, вирізаний під кутом 45° до орієнтації волокон

ПАКМ та конструкційної сталі були використані з бібліотеки матеріалів програмного комплексу.

На рис. 6 показана впорядкована скінченно-елементна модель композиційного зразка, зафіксованого в сталевих захватах, в якій використані три умови координатної симетрії. Похибка скінченно-елементної дискретизації є меншою за 0.5%. Поздовжнє переміщення 0.01 мм було прикладене до бокових поверхонь захвату.

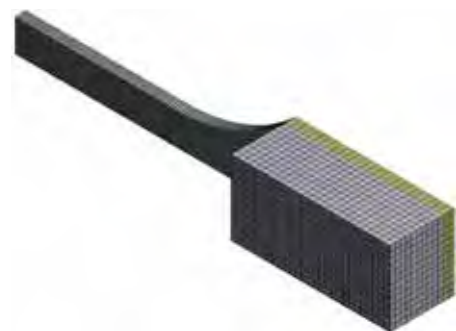


Рис. 6. Симетрична скінченно-елементна модель зразка в захватах

Було виконано два типи розрахунків: 1) для моделі зразка із волокнами, спрямованими під кутами 0° та 90° до напрямку навантаження; 2) для моделі зразка із волокнами, спрямованими під кутом 45° до напрямку навантаження. На рис. 7 а та рис. 7 б показані контурні графіки поздовжніх переміщень для двох описаних випадків.

Обчислені переміщення та коректувальні коефіцієнти зібрані та представлені в таблиці 1. Поле переміщень дало змогу знайти коректувальні коефіцієнти для кожного випадку спрямування волокон та врахувати їх в обробці результатів експериментів: $\kappa = u_g / u_{wp}$.

Таблиця 1

Коректувальні коефіцієнти

Орієнтація волокон під кутом до напрямку навантаження	Переміщення на кінці робочої частини, u_{wp} [м]	Переміщення захвата, u_g [м]	Коректувальний коефіцієнт, k [-]
0° та 90°	$0.615 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	1.625
45°	$0.632 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	1.582

Таблиця 2

Технічні константи композита

T , [°C]	$(E_1(0))_{0^\circ}$, [Па]	$(E_2(0))_{0^\circ}$, [Па]	$(E_1(0))_{45^\circ}$, [Па]	$(\nu_{12}(0))_{0^\circ}$, [-]	$(G_{12}(0))_{0^\circ}$, [Па]
20	$2.225 \cdot 10^{10}$	$2.693 \cdot 10^{10}$	$1.239 \cdot 10^{10}$	0.111	$0.407 \cdot 10^{10}$
100	$0.928 \cdot 10^{10}$	$1.099 \cdot 10^{10}$	$0.228 \cdot 10^{10}$	0.107	$0.064 \cdot 10^{10}$

Таблиця 3

Характерні напруження

Орієнтація волокон під кутом до напрямку навантаження	Умовна границя текучості, [МПа]	Напруження тимчасового опору розриву, [МПа]
0°	80	135
90°	90	160
45°	65	90

5. Результати дослідження та обговорення

Аналіз діаграм розтягування, представлених на рис. 8 *a–в*, дав змогу визначити пружну та пластичну площадки деформацій. Для кінцевого навантаження близько до напруження тимчасового опору розриву процес деформування мав яскраво виражений внесок від явища повзучості.

Точки на графіках показують усереднені значення, визначені на основі виміру в трьох експериментах. Отримані для пружних ділянок діаграм модулі Юнга в кожному напрямку показані кутами нахилу суцільних ліній на графіках.

У таблиці 2 представлені значення вимірних модулів Юнга, оцінених з літератури коефіцієнтів Пуассона та знайдених модулів зсуву для кімнатної температури та температури 100°C.

Як видно на рис. 8, модуль Юнга в першому напрямку волокон (напрямку основи) менший за модуль Юнга в другому напрямку волокон (напрямку утоку) як для кімнатної температури, так і для температури 100°C. Це означає, що в композиційному матеріалі в другому напрямку міститься волокон більше за їхню кількість у першому напрямку. Описана різниця між модулями

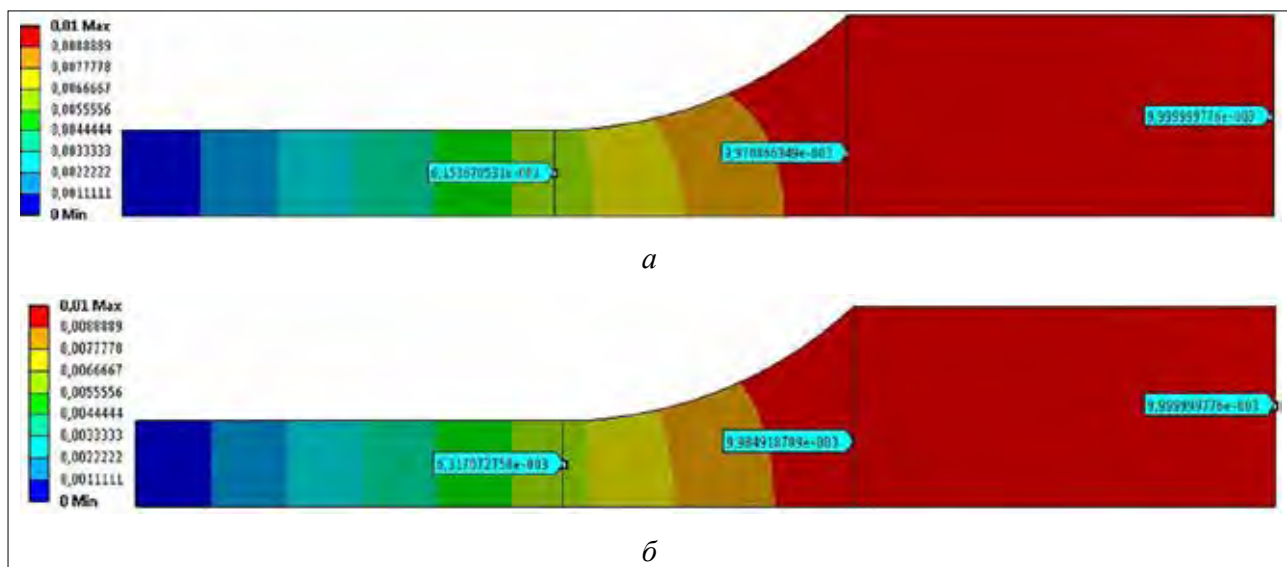


Рис. 7. Контурні графіки поздовжніх переміщень: *a*) для зразка із волокнами під кутами 0° та 90° до напрямку навантаження; *б*) для зразка із волокнами під кутом 45° до напрямку навантаження

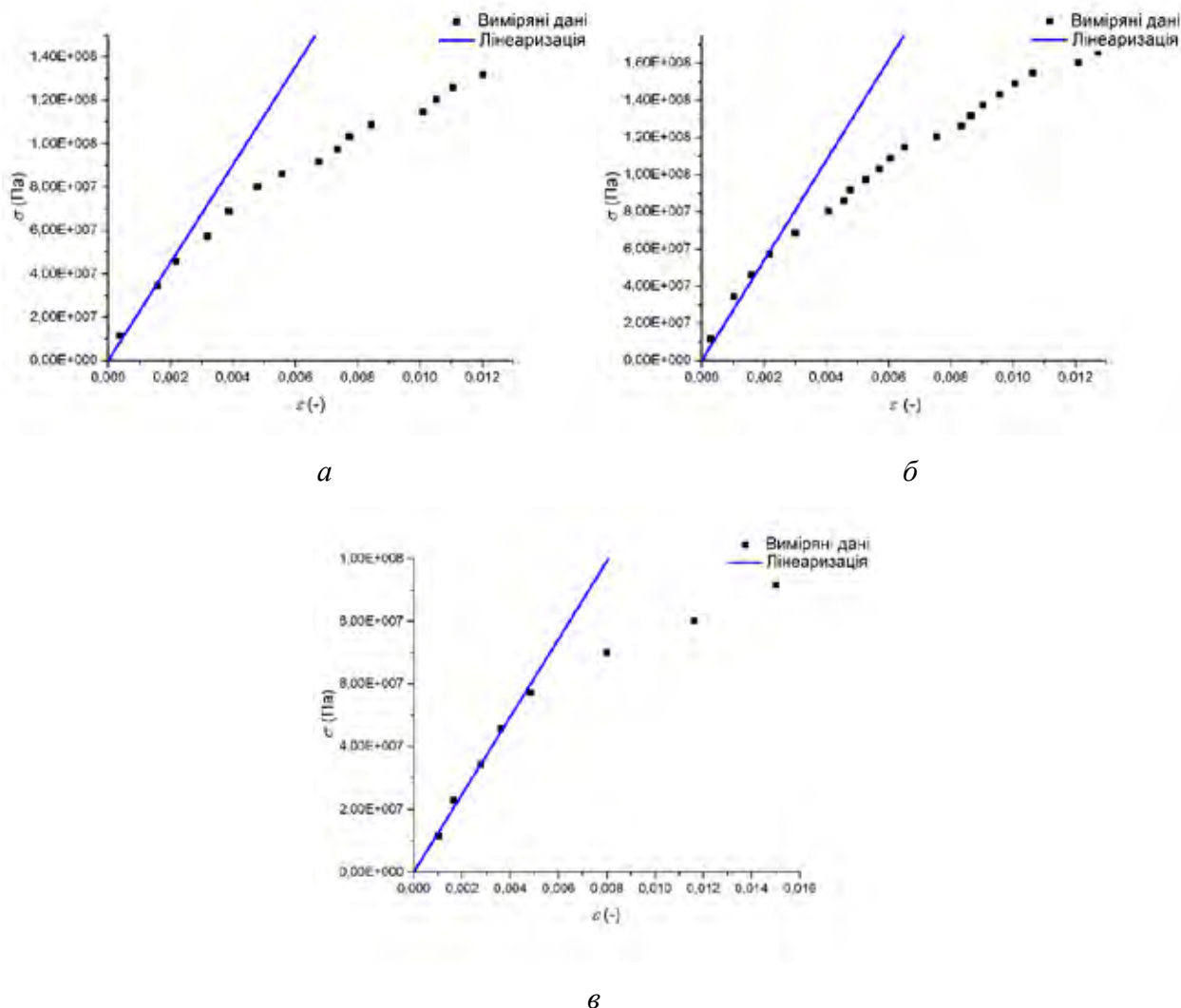


Рис. 8. Діаграми розтягування для кімнатної температури (залежність напружень, [Па] від деформацій, [-]): а) для зразків, вирізаних під кутом 0° ; б) для зразків, вирізаних під кутом 90° ; в) для зразків, вирізаних під кутом 45°

Юнга може також означати нерівність кількості шарів композита в двох напрямках або незбалансованість шарів [31].

У таблиці 3 наведені умовні границі текучості та напруження тимчасового опору розриву для зразків, вирізаних під різними кутами до напрямків армування, визначені за кімнатної температури.

Висновки. Проведене дослідження миттєвих фізико-механічних властивостей та міцності полімерного армованого композиційного матеріалу продемонструвало їхню ортотропію та чутли-

вість до збільшення навколишньої температури. Аналітичні співвідношення плоского напруженого стану ортотропного матеріалу дали змогу провести адекватну обробку результатів експериментів. Скінченно-елементний аналіз процесу навантаження експериментального зразка в захватах уточнив результати визначення технічних констант композиту. Визначені характеристики міцності склопластику в різних напрямках дають змогу застосовувати їх у практиці науково-дослідних та проектно-конструкторських робіт.

Список літератури:

1. Справочник по композиционным материалам: Любин Дж. (ред.). Москва: Машиностроение, 1988. Т. 1, 448 с.
2. Композиционные материалы. Справочник: Карпинос Д.М. (ред.). Київ: Наукова думка, 1985. 588 с.
3. Кравчук А.С., Майборода В.П., Уржумцев Ю.С. Механика полимерных и композиционных материалов. Москва: Наука, 1985. 304 с.

4. Капитонов А.М., Редькин В.Е. Физико-механические свойства композиционных материалов. Упругие свойства. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2013. 532 с.
5. Побердья Б.Е. Механика композиционных материалов. Москва: Изд-во Моск. ун-та, 1984. 336 с.
6. Zak G., Haberer M., Park C.B., Benhabib B. Mechanical properties of short-fibre layered composites: prediction and experiment. *Rapid. Prototyp. J.* 2000. Vol. 6. P. 107–118. DOI: <https://doi.org/10.1108/13552540010323583>
7. Sun Z., Garboczi E.J., Shah S.P. Modeling the elastic properties of concrete composites: Experiment, differential effective medium theory, and numerical simulation. *Cem. Concr. Compos.* 2007. Vol. 29. P. 22–38.
8. Gang P., Jiacheng F., Yuandong L., Danyong W., Zhucai W. Analysis and discussion on impact shear experiment technique of composite laminate. *Proc. 2011 Int. Conf. Electron. Optoelectron.* 2011. P. 350–353. (DOI: <https://doi.org/10.1109/ICEOE.2011.6013378>)
9. Durai Prabhakaran R.T., Andersen T.L., Bech J.I., Lilholt H. Investigation of mechanical properties of unidirectional steel fiber/polyester composites: Experiments and micromechanical predictions. *H. Polym Compos.* 2016. Vol. 37. P. 627–644. DOI: <https://doi.org/10.1002/pc.23220>
10. Saleh M.N., Lubineau G., Potluri P., Withers P.J., Soutis C. Micro-mechanics based damage mechanics for 3D orthogonal woven composites: Experiment and numerical modelling. *Compos. Struct.* 2016. Vol. 156. P. 115–124. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.01.021>
11. Lv L., Huang Y., Cui J., Qian Y., Ye F., Zhao Y. Bending properties of three-dimensional honeycomb sandwich structure composites: experiment and finite element method simulation. *Text. Res. J.* 2017. P. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.1177/0040517517703602>
12. Movaghghar A., Lvov G.I. An energy model for fatigue life prediction of composite materials using continuum damage mechanics. *Appl. Mech. Mater.* 2011. Vol. 110–116. P. 1353–1360. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.110-116.1353>
13. Altenbach H., Fedorov V.A. Structural elastic and creep models of a UD composite in longitudinal shear. *Mech. Compos. Mater.* 2007. Vol. 43. P. 289–298. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11029-007-0028-9>
14. Andrianov I.V., Danishevs'kyi V.V., Guillet A., Pareige P. Effective properties and micro-mechanical response of filamentary composite wires under longitudinal shear. *Eur. J. Mech. – A/Solids.* 2005. Vol. 24. P. 195–206. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2005.01.006>
15. Reddy J.N. *Mechanics of laminated composite plates and shells: theory and analysis.* CRC Press, 2004. 831 p.
16. Warren G. *Fiberglass-reinforced polyester laminate for use in protective structures.* Springfield: National Technical Information Service, U.S. Department of Commerce, 1975. 27 p.
17. Ghilaim K.H. Woven factor for the mechanical properties of woven composite materials. *Journal of Engineering.* 2010. Vol. 16, No. 4. P. 6012–6027.
18. Budhoo Y. Temperature effect on Poisson's ratio of woven composites. *Mechanics of Time-Dependent Materials.* 2011. Vol. 3. P. 163–169. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4614-0213-8_25
19. Мартыненко В.Г., Ульянов Ю.Н. Усовершенствование экспериментальной установки и процедура исследования анизотропных вязкоупругих свойств композиционного материала при повышенных температурах. *Проблемы машиностроения.* 2018. Т. 21, № 2. С. 3–11.
20. Мартыненко В.Г. Експериментальне дослідження анизотропних в'язкопружних властивостей композиційного матеріалу. Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта: тези доповідей XIX міжнародної науково-технічної конференції, м. Київ, 19–22 червня 2018 р. Київ: НТУУ «КПІ» ім. Ігоря Сікорського, 2018. С. 30.
21. Sathishkumar T.P., Satheeshkumar S., Naveen J. Glass fiber-reinforced polymer composites – a review. *J. Reinf. Plast. Compos.* 2014. Vol. 33, Is. 13. P. 1258–1275. DOI: <https://doi.org/10.1177/0731684414530790>
22. Stickel J.M., Nagarajan M. Glass fiber-reinforced composites: from formulation to application. *Int. J. Appl. Glas. Sci.* 2012. Vol. 3. P. 122–136. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.2041-1294.2012.00090.x>
23. Yamini S., Young R.J. The mechanical properties of epoxy resins. *J. Mater. Sci.* 1980. Vol. 15. P. 1823–1831. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00550603>
24. Jordan J.L., Foley J.R., Siviour C.R. Mechanical properties of Epon 826/DEA epoxy. *Mech. Time-Dependent Mater.* 2008. Vol. 12. P. 249–272. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11043-008-9061-x>
25. Ou Y., Zhu D., Zhang H., Huang L., Yao Y., Li G., Bazin M. Mechanical characterization of the tensile properties of glass fiber and its reinforced polymer (GFRP) composite under varying strain rates and temperatures. *Polymers.* 2016. Vol. 8. P. 1–16. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym8050196>
26. Dogan A., Atas C. Variation of the mechanical properties of E-glass/epoxy composites subjected to hygrothermal aging. *J. Compos. Mater.* 2016. Vol. 50. P. 637–646. DOI: <https://doi.org/10.1177/0021998315580451>
27. ASTM D618-13. Standard practice for conditioning plastics for testing. American Society for Testing and Materials, 2013. 4 p. DOI: <https://doi.org/10.1520/D0618>
28. ASTM D638-14. Standard test method for tensile properties of plastics. American Society for Testing and Materials, 2014. 17 p. DOI: <https://doi.org/10.1520/D0638-14>

29. ASTM D3039/D3039M-17. Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials. American Society for Testing and Materials, 2017. 13 p. DOI: https://doi.org/10.1520/D3039_D3039M-17

30. ANSYS® Free Student Product Downloads. URL: <https://www.ansys.com/academic/free-student-products> (дата звернення: 20.11.2018).

31. Agarwal B.D., Broutman L.J., Chandrashekhara K. Analysis and performance of fiber composites. Wiley, 2006. 562 p.

ЧИСЛЕННО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОЦЕДУРА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭФФЕКТИВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК И ПРОЧНОСТИ АРМИРОВАННОГО КОМПОЗИТА

В статье описано численно-экспериментальное исследование эффективных упругих характеристик и мгновенной прочности полимерного армированного композиционного материала с тканевой структурой армирования. Оно базируется на проведении экспериментов на растяжение образцов, вырезанных из композитной пластины, под разными углами с направлениями армирования и последующей аналитической обработкой результатов. Для уточнения полученных экспериментальных данных была построена конечно-элементная расчетная модель композиционного образца в захватах с ориентацией волокон под разными углами к приложенной нагрузке. Такой комплексный подход позволил получить при комнатной и повышенной температурах технические константы композиционного материала в плоскости, а также определить параметры его прочности при нагрузке в разных направлениях. Приведенное исследование расширяет известные данные о физико-механических свойствах полимерных армированных композиционных материалов и позволяет оценить особенности их анизотропии, вызванные направленной структурой армирования композита.

Ключевые слова: анизотропия, композиционный материал, экспериментальное исследование, мгновенная прочность, армирование.

A NUMERICAL-EXPERIMENTAL PROCEDURE FOR DETERMINING THE EFFECTIVE CHARACTERISTICS AND STRENGTH OF REINFORCED COMPOSITE

The paper presents a numerical-experimental study of effective elastic characteristics and instantaneous strength of polymer reinforced composite material with fabric reinforcement structure. It is based on a series of experiments on stretching of samples, cut from a composite plate at different angles to reinforcement directions, and further analytical processing of the results. In order to clarify the received experimental data, a finite-element computational model of the composite sample in grips with fiber orientation at different angles to the applied load was constructed. Such a comprehensive approach allowed to obtain in-plane technical constants of composite material at room and elevated temperatures, as well as to determine parameters of its strength when loading in different directions. The above study expands the known data on physical and mechanical properties of polymer reinforced composite materials and enables evaluating the features of their anisotropy caused by a directed reinforcement structure of the composite.

Key words: anisotropy, composite material, experimental study, instant strength, reinforcement.

Поліщук М.М.

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

ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ МОБІЛЬНОГО РОБОТА З ГАЗОВИМ НАКОПИЧУВАЧЕМ ЕНЕРГІЇ

У роботі описано принципово нову конструкцію мобільного робота з газовим накопичувачем енергії й математичну модель оптимізації його параметрів. Запропоновано критерії оптимізації конструктивних і технологічних параметрів, що визначають утримання робота на поверхні довільної орієнтації в технологічному просторі. Наведено результати моделювання і графоаналітичні залежності параметрів модуля нагромадження й перетворення енергії руху робота.

Ключові слова: мобільні роботи, крокуючі механізми, роботи вертикального переміщення, альпіністські роботи.

Постановка проблеми. Ключовим завданням створення мобільних роботів довільної орієнтації в технологічному просторі, відомих у міжнародних виданнях як Climber Robot (альпіністський робот), є забезпечення надійного утримання робота на поверхні переміщення. Більшість сучасних досліджень у цій області спрямовані на синтез конструкцій підсистем зчеплення мобільного робота з поверхнею переміщення. Водночас більш перспективним є розв’язання зазначеної проблеми шляхом підвищення енергетичної ефективності приводів роботів для зменшення їх сумарної потужності, а значить і маси робота для зниження гравітаційного навантаження під час виконання технологічних операцій. Реалізація такого підходу можлива у разі створення приводів, здатних накопичувати потенційну енергію на кожному попередньому кроці переміщення робота й перетворювати її на кінетичну енергію руху на кожному наступному кроці руху робота.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Загальна структура мобільного робота (Рис. 1) містить підсистему керування, підсистему втримання на поверхні й переміщення, сенсори аналізу навколишнього середовища, систему живлення й технологічне оснащення [1, с. 88].

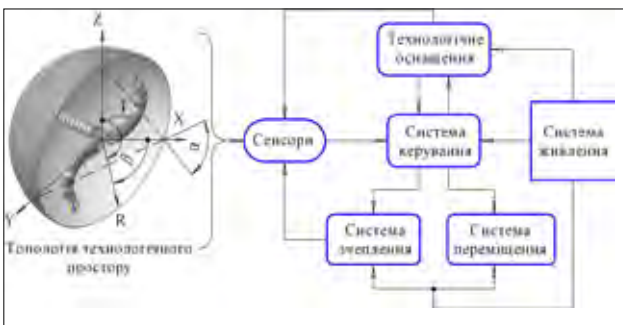


Рис. 1. Загальна структура підсистем мобільних роботів

Сенсорна підсистема зв’язує робота з топологією технологічного простору, який може бути представлено у вигляді прямокутної, Декартової, (X, Y, Z) або сферичної (R, β , γ) системи координат, точки яких досягаються виконавчими органами робота радіусом R за кутів їх вигину β , γ у зоні сервісу, створеній кутом α . Найбільше енергоспоживання властиве системам утримання й переміщення. Структура підсистем руху мобільних роботів довільної орієнтації і їх зчеплення з поверхнею переміщення представлена на Рис. 2. Підсистема приводів забезпечує рух елементів конструкції робота у просторі й безпосередньо визначає вид його трансмісії. Електроприводи мають більшу здатність до гнучкого програмування, ніж пневматичні приводи, і меншу вагу, ніж гідроприводи, хоча й поступаються останнім за показниками точності позиціонування й питомої потужності. Як видно на Рис. 2, класична структура таких підсистем не включає модулі нагромадження й перетворення енергії руху, які будуть запропоновані нижче. Однак спочатку розглянемо досягнутий рівень реалізації підсистеми зчеплення роботів із поверхнею переміщення [2, с. 33–42], оскільки ці підсистеми домінують в енергетичному споживанні мобільних роботів.



Рис. 2. Структура підсистем утримання й переміщення роботів

З наведеної структури найбільш поширеними стали вакуумні захвати [3, с. 2; 4, с. 348], що пояснюється інваріантністю цього виду зчеплення щодо фізичних властивостей поверхні переміщення мобільного робота. Однак цей вид зчеплення вразливий для припливу повітря в область вакууму, що знижує його надійність. Застосування електромагнітних захватів зчеплення [5, с. 3–6], незважаючи на простоту їх конструкції та швидкодію, обмежено поверхнями переміщення, що мають феромагнітні властивості. Оснащення мобільних роботів механічними захватами [6, с. 9; 7, с. 37–46], безумовно, підвищує надійність утримання робота на поверхні переміщення, однак необхідність наявності передавальних механізмів, унаслідок збільшення ваги робота, приводить до росту гравітаційного навантаження. Прогресивними способами зчеплення з погляду енергетичної ефективності є технології, засновані на так званій «сухій адгезії» [8, с. 6] та електричній адгезії [9, с. 7], але повільність процесу цього виду зчеплення поки що перешкоджає їх промислового використання.

Викладений вище аналіз показує, що застосування відомих приводів руху роботів й удосконалювання систем зчеплення з поверхнею переміщення не вирішує проблеми енергетичної ефективності трансмісії мобільних роботів довільної орієнтації у просторі.

Постановка завдання. Метою досліджень є створення привода мобільного робота, що має здатність нагромадження потенційної енергії й перетворення її на кінетичну енергію руху, а також оптимізація параметрів нового типу привода, що в результаті забезпечить підвищення енергетичної ефективності роботів довільної орієнтації.

Виклад основного матеріалу дослідження.
Конструкція мобільного робота. Конструкція робота із пружинним накопичувачем енергії на сьогодні детально розглянута [10, с. 3; 11, с. 108] і здійснено його кінетостатичний аналіз [12, с. 117–119]. Так, для розуміння подальшого викладу стосовно оптимізації параметрів спочатку розглянемо спосіб переміщення робота з *газовим накопичувачем енергії*. Відмінність останнього від пружинного накопичувача енергії полягає у практично необмеженому ресурсі роботи, оскільки відомо, що всім пружинним елементам із будь-яким значенням модуля Юнга (модуля пружності) властиве нагромадження залишкових напруг і, як наслідок, обмежений ресурс роботи.

На Рис. 3 показана розрахункова схема робота з газовим накопичувачем енергії. На корпусі 1

робота встановлено неповно поворотні приводи 2, що через зубчасту трансмісію (на Рис. 3 не показано) мають кінематичний зв'язок із педипуляторами у вигляді телескопічних циліндрів 3 і 4, які, будучи розділеними поршнем 5, утворюють газову камеру довжиною L_0 і діаметром D . Кожна пара педипуляторів оснащена захватами 6, 7 і 8, 9. Тип захватів може бути різним, наприклад вакуумним, механічним або електромагнітним, що тут не має принципового значення.

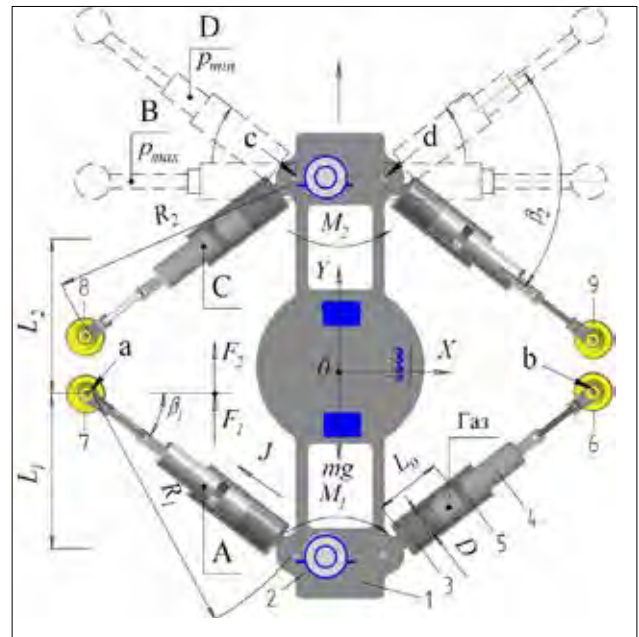


Рис. 3. Схема мобільного робота (вид у плані)

Переміщення робота здійснюється таким чином. У вихідному положенні захвати 6 і 7 включені, тобто зчеплені з поверхнею переміщення, а захвати 8 і 9 іншої пари педипуляторів вільні від зчеплення з указаною поверхнею. На першому кроці переміщення привод 2 крутним моментом M_1 повідомляє про поворот на кут β_1 телескопічним циліндрам 3 і 4 навколо відповідних цим захватам точок «а» і «б», переміщуючи тим самим корпус робота в напрямку осі Y. Інша пара педипуляторів (на Рис. 3 верхня) під дією такого самого привода й моменту M_2 , будучи вільною від зчеплення з поверхнею переміщення, повертається на кут β_2 , але вже навколо точок «с» і «d». Під час руху на першому кроці $0 \leq \beta_1 \leq 45^\circ$ робот переміститься на величину L_1 , і нижні педипулятори перейдуть із положення «А» у положення «В», а верхні педипулятори зроблять поворот із позиції «С» у позицію «D».

Оскільки на першому кроці захвати 6 і 7, на відміну від вільних захватів 8 і 9, зчеплені з поверхнею переміщення, то під час переміщення кор-

пуса 1 робота на величину L_1 відбувається стиск газу в телескопічних циліндрах 3 і 4. Наслідком цього є створення пружної сили J до досягнення кута повороту значення $\beta_1 = 45^\circ$. Далі для економії енергоспоживання привод 2 відключається, і робот рухається на величину L_2 за $45^\circ \leq \beta_1 \leq 90^\circ$ уже під дією пружної сили J , тобто за рахунок сили розширення раніше стисненого газу в циліндрах 3 і 4. Після повороту нижніх на Рис. 3 педіпуляторів на кут $\beta_1 = 90^\circ$ за командою системи керування відбувається відключення від зчеплення з поверхнею захватів 6 і 7 і, навпаки, включення зчеплення з поверхнею двох інших захватів – 8 і 9. Тепер уже газ стискається у верхніх педіпуляторах (див. Рис. 3), і описаний вище цикл руху повторюється.

Таким чином, на першому кроці переміщення L_1 під час повороту педіпуляторів на кут $0 \leq \beta_1 \leq 45^\circ$ за рахунок стиску газу відбувається нагромадження потенційної енергії, а на другому кроці під час повороту педіпуляторів на кут $45^\circ \leq \beta_1 \leq 90^\circ$ накопичена енергія перетворюється на кінетичну енергію руху робота під дією пружної сили J раніше стисненого газу, що розширюється.

Оскільки мобільні роботи, як відомо, використовують автономні джерела живлення від традиційних акумуляторних батарей, із властивою їм низькою питомою потужністю (кВт/кг) й обмеженою ємністю (А/год), до сонячних батарей, що вимагають великих поглинальних площ, то економія енергетичних витрат для мобільних роботів довільної орієнтації має принципове значення.

Оптимізація параметрів робота. Для побудови моделі оптимізації розглянемо мобільний робот як дворівневу технічну систему. Умовно як перший рівень встановимо підсистему втримання робота на поверхні довільної орієнтації, а як другий рівень – підсистему приводів робота, оскільки, як зазначено вище, ці дві підсистеми визначають енергетичну ефективність мобільного робота (без урахування енергії на силові технологічні операції за його виробничим призначенням).

Залежно від типу підсистеми зчеплення критерієм оптимізації на 1-му рівні моделі буде сила зчеплення з поверхнею переміщення робота, а функціоналом – формула, що визначає величину цієї сили. Якщо як пристрій зчеплення використовуються вакуумні захвати, то за цільову функцію 1-го рівня візьмемо формулу сили Q зчеплення вакуумного присосу з поверхнею переміщення, яка визначається таким чином:

$$Q = \frac{\pi d^2}{4} K_s (p_a K_a - p_v) K \rightarrow \max \quad (1)$$

за промислово доцільних обмежень із конструкторських міркувань:

$$(25 \leq d \leq 100) 10^{-3}; 0,9 \leq K_s \leq 1; (50 \leq p_v \leq 80) \times 10^3; 0,65 \leq K \leq 0,85; \quad (2)$$

де d – діаметр зони вакуумування під присосом, (м); $\pi d^2/4$ – площа, обмежена внутрішнім контуром присосу (м²); K_s – коефіцієнт зменшення площі присосу внаслідок деформації ущільнення; $p_a = 101 \cdot 10^3$ (Па) – атмосферний тиск; p_v – глибина вакууму всередині камери присосу (Па); K_a – коефіцієнт, за яким вираховують зміни атмосферного тиску ($K_a = 0,9$); K – коефіцієнт, за яким вираховують приплив повітря в місці контакту ущільнення присосу з поверхнею переміщення робота ($K = 0,65 \dots 0,85$).

Оскільки накладено обмеження окремо на кожну незалежну змінну, то для знаходження оптимального значення цільової функції використаємо класичний координатний метод оптимізації. Знайшовши частинні похідні за кожною незалежною змінною, легко переконались, що жодна з похідних не дорівнює нулю ні в середині області значень змінних параметрів, ні на її границі, а тому цільова функція Q досягає екстремальних значень на границі області зміни параметрів. Отже, максимальне і мінімальне значення цільової функції (1) дорівнюватиме:

$$Q_{\max} = \frac{\pi d_{\max}^2}{4} K_s^{\max} (p_a K_a^{\max} - p_v^{\min}) K_{\max};$$

$$Q_{\min} = \frac{\pi d_{\min}^2}{4} K_s^{\min} (p_a K_a^{\min} - p_v^{\max}) K_{\min}. \quad (3)$$

Максимально можлива зсувна сила F_T зчеплення з поверхнею переміщення дорівнює $F_T = \mu Q_{\max}$, де μ – коефіцієнт тертя ковзання захвату з поверхнею переміщення. Від цієї сили залежить максимальна загальна маса m робота за прискорення вільного падіння $g = 9,8$ м/с²:

$$2F_T \cos(45^\circ) > mg \Rightarrow m < \frac{\sqrt{2}\mu Q_{\max}}{g}. \quad (4)$$

Щоб перейти до оптимізації підсистеми приводів, необхідно спочатку визначити параметри газового накопичувача енергії. У такому разі як пружний елемент використовується повітря у герметичній циліндричній камері довжиною L_0 і діаметром D поперечного перетину (див. Рис. 3). На першому етапі поршень стискає повітря, і нагромаджується певний запас потенційної енергії, а на другому етапі повітря розширюється і віддає набуту енергію. Припускаємо, що процес відбувається за постійної температури, а тому згідно із законом Бойля – Маріотта справджується рівність $p_0 V_0 = p V$, де $p_0 = p_{\min}$ – тиск у камері за максимального її об'єму $V_0 = \frac{\pi D^2}{4} L_0$; p – тиск у камері за довільного положення поршня; $V = \frac{\pi D^2}{4} (L_0 - x)$; x – поточне переміщення поршня.

Зі схеми Рис. 3 очевидно, що максимальне переміщення поршня становить:

$$x_{max} = R_1 - R_1 \cos 45 = R_1 \left(1 - \frac{\sqrt{2}}{2} \right), \quad (5)$$

де R_1 – довжина ноги (педіпулятора) робота у вільному стані.

Переміщення x поршня залежить від кута β_1 повороту опорної ноги:

$$x = R_1 \left(1 - \frac{\cos 45^\circ}{\cos(45^\circ - \beta_1)} \right); \quad 0 \leq \beta_1 \leq 90^\circ; \quad 0 \leq x \leq x_{max}. \quad (6)$$

Враховуючи вище наведене рівняння Бойля – Маріотта і введені позначення, одержуємо формулу для знаходження тиску за довільного положення поршня газового накопичувача енергії:

$$p = p_o \frac{L_o}{L_o - x}. \quad (7)$$

Якщо мінімальним тиском p_o і максимальним тиском p_{max} (за $x = x_{max}$) задатися наперед, то з формули (7) знаходимо необхідну довжину камери:

$$L_o = \frac{p_{max} x_{max}}{p_{max} - p_o}. \quad (8)$$

Отже, пружну силу J , яка діє на поршень, обчислюємо за формулою:

$$J = p \frac{\pi D^2}{4} - p_a \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi D^2}{4} \left(p_o \frac{L_o}{L_o - x} - p_a \right), \quad (9)$$

де p_a – атмосферний тиск за нормальних умов.

Сила зчеплення Q впливає також на допустиме значення діаметра газової камери, тому що повинна виконуватися нерівність:

$$F_T > J_{max} \Rightarrow \mu Q_{max} > \frac{\pi D^2}{4} (p_{max} - p_a), \quad (10)$$

а звідси знаходимо діаметр газової камери накопичувача енергії:

$$D < \sqrt{\frac{4\mu Q_{max}}{\pi (p_{max} - p_a)}}. \quad (11)$$

Під час переміщення робота на першому етапі $0 \leq \beta_1 \leq 45^\circ$ однією із цільових функцій може бути сила опору рухові від пружного елемента:

$$f = J \sin(45^\circ - \beta_1) = \frac{\pi D^2}{4} \left(p_o \frac{L_o \cos(45^\circ - \beta_1)}{(L_o - R_1) \cos(45^\circ - \beta_1) + R_1 \cos 45^\circ} - p_a \right) \cdot \sin(45^\circ - \beta_1) \rightarrow \min \quad (12)$$

Для розгляду поведінки функції (12) у разі зміни кута β_1 знайдемо похідну:

$$\frac{df}{d\beta_1} = \frac{\pi D^2}{4} \left(\frac{p_o L_o \cos(45^\circ - \beta_1) \sin(45^\circ - \beta_1) - \sin 2\beta_1 ((L_o - R_1) \cos(45^\circ - \beta_1) + R_1 \cos 45^\circ)}{((L_o - R_1) \cos(45^\circ - \beta_1) + R_1 \cos 45^\circ)^2} + \frac{p_o \cos(45^\circ - \beta_1)}{((L_o - R_1) \cos(45^\circ - \beta_1) + R_1 \cos 45^\circ)} \right).$$

Легко оцінити, що похідна від'ємна, якщо $\beta_1 = 45^\circ$ і якщо $\beta_1 = 0$, тобто цільова функція (12) досягає мінімального значення на кінцях проміжку зміни кута ($\beta_1 = 45^\circ$) – $f=0$. Обчислимо потенційну енергію U , що нагромаджується під час стискання повітря:

$$U = J = \int_0^x J dz = \frac{\pi D^2}{4} \int_0^x \left(p_o \frac{L_o}{L_o - z} - p_a \right) dz = \frac{\pi D^2}{4} \left(p_o L_o \ln \frac{L_o}{L_o - x} - p_a x \right) \quad (13)$$

Максимальне значення потенційної енергії в одній газовій камері становить:

$$U_{max} = \frac{\pi D^2}{4} \left(p_o L_o \ln \frac{L_o}{L_o - x_{max}} - p_a x_{max} \right). \quad (14)$$

На цьому самому етапі руху робота розглянемо ще одну цільову функцію, яка відображає різницю між силою тертя μQ і рушійною силою. Остання не повинна перевищувати силу зчеплення робота з поверхнею переміщення:

$$W = \mu Q - \sqrt{(F_1 / 2 - J \sin(45^\circ - \beta_1) - (m + 4m_1)g / 2)^2 + (J \cos(45^\circ - \beta_1))^2} \geq 0 \rightarrow \min, \quad (15)$$

де $F_1 = 2M_i / n z$ – сила від рушійного моменту M_i ; i, n, z – відповідно передатне число, модуль і кількість зубів шестерні трансмісії, що з'єднує двигун із педіпулятором робота; сила стислого повітря у формулі (15):

$$J = \frac{\pi D^2}{4} \left(p_o \frac{L_o \cos(45^\circ - \beta_1)}{(L_o - R_1) \cos(45^\circ - \beta_1) + R_1 \cos 45^\circ} - p_a \right)$$

за обмежень, вжитих із міркувань промислової доцільності:

$$5 \leq M_1 \leq 10; \quad 1 \leq i \leq 3; \quad 0.001 \leq n \leq 0.002;$$

$$20 \leq z \leq 40; \quad 0 \leq \beta_1 \leq 45^\circ; \quad 0.025 \leq D \leq 0.050;$$

$$120000 \leq p \leq 400000 \text{ (Па)},$$

отримаємо для маси m робота і маси m_1 педіпулятора:

$$F_1 L_1 \geq (m + 3m_1) g L, \quad (16)$$

$$F_1 L_1 \geq (m + 3m_1) g \frac{L}{2} + 2U_{max}. \quad (17)$$

Нерівність (16) указує, що енергії, яку отримала механічна система внаслідок виконання роботи сили F_1 на відріжку L_1 , досить для переміщення робота на відстань L_2 . Нерівність (17) указує, що роботи, яку виконала сила F_1 на відріжку L_1 , достатньо і для нагромадження максимальної потенційної енергії у стисненому повітрі. Звичайно, залежно від значення діаметра D поршня газової камери (Рис. 3) досить виконання однієї з умов, а інша буде виконана автоматично. Так, наприклад, для значень

$$D < \sqrt{\frac{(m + 3m_1) g L}{\pi \left(p_o L_o \ln \frac{L_o}{L_o - x_{max}} - p_a x_{max} \right)}}, \quad (18)$$

досить, щоб виконувалась умова (16), а за D більшого достатньо виконання нерівності (17). Для оцінки поведінки цільової функції у разі зміни кута β_1 знайдемо похідну цільової функції (15):

$$\frac{\partial W}{\partial \beta_1} = \frac{u \left(\frac{\partial J}{\partial \beta_1} \sin(45^\circ - \beta_1) - J \cos(45^\circ - \beta_1) \right) - J \cos(45^\circ - \beta_1) \left(\frac{\partial J}{\partial \beta_1} \cos(45^\circ - \beta_1) + J \sin(45^\circ - \beta_1) \right)}{\sqrt{u^2 + (J \cos(45^\circ - \beta_1))^2}}, \quad (19)$$

де:

$$u = (F_1/2 - J \sin(45^\circ - \beta_1) - (m + 4m_1)g/2);$$

$$\frac{\partial J}{\partial \beta_1} = \frac{\pi D^2}{4} \left(p_o \frac{L_o R_1 \cos 45^\circ \sin(45^\circ - \beta_1)}{(L_o - x)^2 \cos^2(45^\circ - \beta_1)} \right). \quad (20)$$

Легко переконатись, що ця похідна від'ємна за усіх значень кута $0 \leq \beta_1 \leq 45^\circ$, а тому мінімального значення цільова функція W досягає, коли кут $\beta_1 = \beta_o$ (де β_o – граничне значення кута β_1 , за якого ще діє сила F_1). Підставивши $Q = Q_{max}$ і $W = 0$, одержуємо формулу для знаходження максимального значення сили руху залежно від значень діаметра D і кута β_o :

$$F_1^{max} = 2\sqrt{(\mu Q_{max})^2 - (J_o \cos(45^\circ - \beta_o))^2} + (m + 4m_1)g + 2J_o \sin(45^\circ - \beta_o), \quad (21)$$

де сила пружності стиснення газу J_o , коли ще діє сила приводу F_1 , становить

$$J_o = \frac{\pi D^2}{4} \left(p_o \frac{L_o \cos(45^\circ - \beta_o)}{(L_o - R_1) \cos(45^\circ - \beta_o) + R_1 \cos 45^\circ} - p_a \right).$$

За результатами моделювання отримано графіки Рис. 4, що показують, як змінюється значення рушійної сили F_1 на першому етапі $0 \leq \beta_1 \leq 45^\circ$ переміщення робота залежно від діаметра D поршня пружного середовища та сили F_1 , яка забезпечує переміщення робота за перший цикл, за різних значень кута β_o . Допустимі значення сили F_1 і діаметра D , з міркувань забезпечення гарантованого зчеплення робота з поверхнею переміщення та запобігання його відриву, містяться в області, яка розміщена між прямою лінією і відповідною кривою. Ці графіки можуть використовуватись проектувальником мобільного робота як номограма для визначення параметрів газового накопичувача енергії.

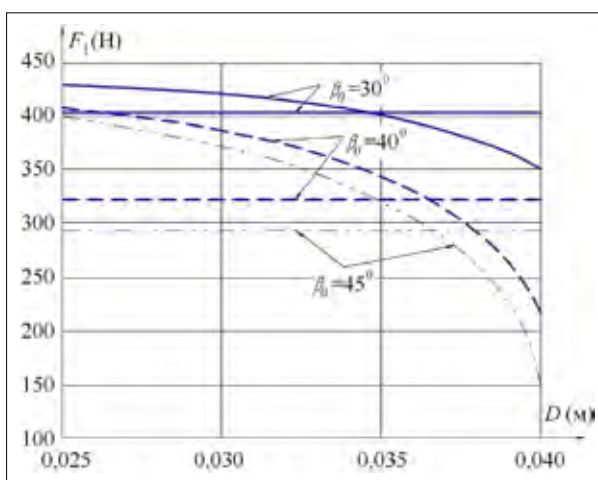


Рис. 4. Графіки зміни рушійної сили F_1 на першому етапі руху робота

На другому етапі руху робота за цільову функцію візьмемо рушійну силу F_2 , яка діє на меха-

нічну систему з боку пружного середовища (газу) у разі *вимкненого* приводу та повороту ніг робота в межах $45^\circ \leq \beta_1 \leq 90^\circ$:

$$F_2 = -\frac{\pi D^2}{4} \left(p_o \frac{L_o \cos(45^\circ - \beta_1)}{(L_o - R_1) \cos(45^\circ - \beta_1) + R_1 \cos 45^\circ} - p_a \right) \sin(45^\circ - \beta_1) \rightarrow \max \quad (22)$$

Знайдемо екстремальні точки функції F_2 . Для цього обчислимо похідну і прирівняємо її до нуля:

$$\frac{\partial F_2}{\partial \beta_1} = \left(\begin{array}{l} -\sin 2\beta_1((L_o - R_1) \cos(45^\circ - \beta_1) + R_1 \cos 45^\circ) - \\ p_o L_o \frac{0.5 \cos 2\beta_1 (L_o - R_1) \sin(45^\circ - \beta_1)}{((L_o - R_1) \cos(45^\circ - \beta_1) + R_1 \cos 45^\circ)^2} + \\ + p_a \cos(45^\circ - \beta_1) = 0 \end{array} \right). \quad (23)$$

Розв'язавши рівняння (23) числовим методом, знаходимо значення кута $\beta_1 = \beta^*$, за якого функція F_2 досягає максимуму, оскільки похідна, переходячи через критичну точку, змінює знак із плюса на мінус:

$$F_2^{max} = -\frac{\pi D^2}{4} \left(p_o \frac{0.5 L_o \cos(2\beta^*)}{(L_o - R_1) \cos(45^\circ - \beta^*) + R_1 \cos 45^\circ} - p_a \sin(45^\circ - \beta^*) \right). \quad (24)$$

Із графіків Рис. 5 видно, що збільшення діаметра D газовой камери впливає на збільшення рушійної сили F_2 непропорційно, інакше кажучи, ефективна площа поршня $\pi D^2/4$ має домінуючий вплив на значення пружної рушійної сили на другому етапі переміщення мобільного робота.

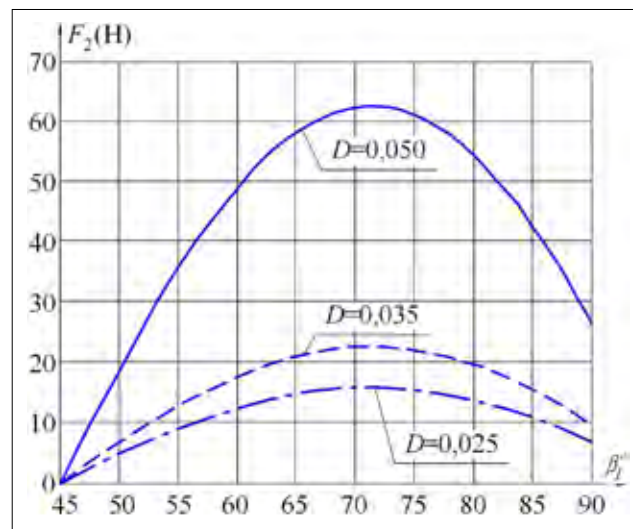


Рис. 5. Графіки зміни значення рушійної F_2^{max} залежно від кута β_1 і діаметра D (м) поршня газовой камери

Для запобігання ударним навантаженням наприкінці циклу переміщення бажано, щоб швидкість корпусу робота була близькою до нуля, а тому на другому етапі $45^\circ \leq \beta_1 \leq 90^\circ$ можемо прийняти за цільову функцію енергії T_k :

$$T_k = U_{max} - U + G_2 R_2 \cos 45^\circ \operatorname{tg}(45^\circ - \beta) + T_0 \geq 0 \Rightarrow \min, \quad (25)$$

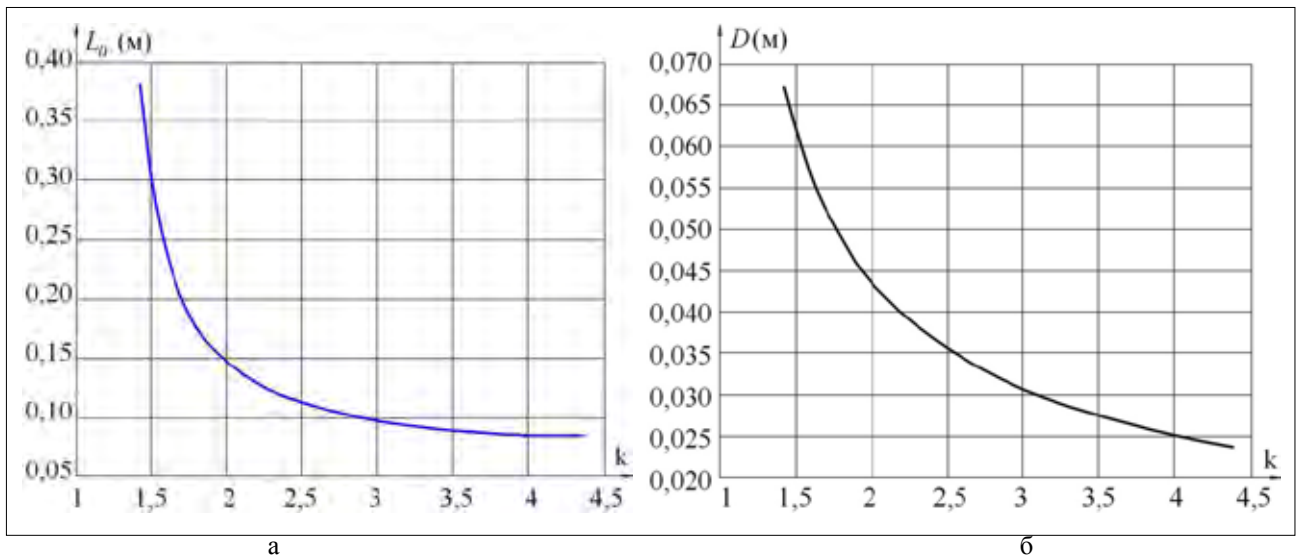


Рис. 6. Графіки зміни довжини L_0 (а) і діаметра D (б) газової камери залежно від величини максимального тиску P_{max} ($k = P_{max}/P_a$)

де $T_o > 0$ – кінетична енергія на початку другого етапу; U_{max} і U – відповідно потенційна енергія пружного середовища на початку етапу та у довільному положенні опорної ноги на другому етапі переміщення. Третій доданок у виразі (25) – це робота сил ваги G_2 мобільного робота.

За результатами моделювання отримано графоаналітичні залежності (Рис. 6), що відображають зміни довжини L камери (а) і зміни діаметра D камери (б) залежно від величини максимального тиску P_{max} ($k = P_{max}/P_a$). У разі дотримання наведених промислово доцільних обмежень, що вжиті із проектних міркувань та конструкторського досвіду автора, ці графіки у сукупності з наданими вище можуть бути безпосередньо використаними як номограми для проектування мобільного робота з газовим накопичувачем потенційної енергії.

Якщо у процесі проектування виникає потреба в інших обмеженнях, то за допомогою робочих формул (6), (8) та (9), (11) легко розрахувати нові значення параметрів газового накопичувача.

Для зручності знаходження оптимальних (точніше квазіоптимальних) співвідношень параметрів робота рекомендується застосовувати надану інженерну методику в середовищі математичних програм (MATLAB, MathCAD чи схожих на них).

Висновки. Використання газового накопичувача енергії руху крокуючого мобільного робота дозволяє на кожному наступному кроці переміщення суттєво економити енергетичні витрати, що має принципове значення для роботів, у яких використовують автономні джерела живлення приводів.

Дотримання умов, визначених нерівностями (4), (10) та (25), забезпечує надійне утримання мобільного робота на поверхні довільної орієнтації у просторі.

Розроблена методика інженерного розрахунку параметрів газових накопичувачів енергії дозволяє здійснювати не тільки їх робоче проектування, а й знаходити оптимальні або принаймні квазіоптимальні співвідношення конструктивно-технологічних параметрів робота.

Список літератури:

1. Персіков В.К., Поліщук М.М. Аналіз проблем створення технологічних роботів вертикального переміщення. Адаптивні системи автоматичного управління. 2014. № 1(24). С. 87–95.
2. Raju D.D., Jaju S.B. Developments in wall climbing robots: a review. International journal of engineering research and general science. 2014. № 2. P. 33–42.
3. Climber robot: Patent 5551525 US: Int. Cl. B62D 57/032. Appl. № 293498; filed. 19.08.1994; publ. 03.09.1996. 17 p.
4. Чашухин В.Г. Исследование параметров движения робота со скользящим уплотнением. Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2011. № 4(2). С. 347–349.
5. Climbing vehicle with suspension mechanism: pat. 9428231 US: Int.Cl. B62D 55/00. Appl. № 179464; filed. 12.02.2014; publ. 30.08.2016. 26 p.

6. Saunders A., Goldman D.I., Fullb R.J., Buehler M. The RiSE Climbing Robot: Body and Leg Design. Boston Dynamics, Unmanned Systems Technology VIII. Proc. of SPIE. Vol. 6230. Boston, 2005.
7. Tin L.L., Yangsheng Xu. Tree climbing robot: design, kinematics and motion planning. New York, 2012. 178 p.
8. Manuel F.S., Machado J.A.T. A survey of technologies and applications for climbing robots' locomotion and adhesion. Climbing and Walking Robots. London, 2010. 508 p.
9. Yehya M., Hussain S., Wasim A., Jahanzaib M., Abdalla H. Cost effective and light weight unipolar electro adhesion pad technology for adhesion mechanism of wall climbing robot. International Journal of Robotics and Mechatronics. 2014. Vol. 2, № 1. P. 1–10.
10. Спосіб переміщення педипуляторів крокуючого робота і пристрій для його здійснення: пат. 111021 Україна: МПК В62D57/032. № а201411741; заявл. 30.10.2014; опубл. 10.03.2016, Бюл. № 5. 10 с.
11. Полищук М.Н. Педипулятор робота вертикального перемещения с возможностью рекуперации энергии движения. Адаптивные системы автоматического управления. 2016. № 1(28). С. 107–115.
12. Polishchuk M.S., Oliinyk V.P. Mobile climbing robot with elastic energy accumulators. Mechanics and Advanced Technologies. 2018. № 1(82). P. 116–122.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ МОБИЛЬНОГО РОБОТА С ГАЗОВЫМ НАКОПИТЕЛЕМ ЭНЕРГИИ

В работе изложены описание принципиально новой конструкции мобильного робота с газовым накопителем энергии и математическая модель оптимизации его параметров. Предложены критерии оптимизации конструктивных и технологических параметров, которые определяют удержание робота на поверхности произвольной ориентации в технологическом пространстве. Приведены результаты моделирования и графоаналитические зависимости параметров модуля накопления и преобразование энергии движения робота.

Ключевые слова: мобильные роботы, шагающие механизмы, роботы вертикального перемещения, альпинистские роботы.

OPTIMIZATION OF THE PARAMETERS OF THE MOBILE ROBOT WITH GAS GENERATOR OF ENERGY

The article describes a fundamentally new design of a mobile robot with a gas energy storage and a mathematical model for optimizing its parameters. The optimization criteria for the design and technological parameters that determine the robot's stability on the surface of arbitrary orientation in the technological space are proposed. The results of modelling and graph-analytical dependences of the parameters of the storage modulus and the transformation of the robot's motion energy are proposed.

Key words: mobile robots, walking mechanisms, robots of vertical movement, climbing robots.

Рудик А.В.

Чернігівський національний технологічний університет

Венжега В.І.

Чернігівський національний технологічний університет

ЕФЕКТИВНЕ ШЛІФУВАННЯ ПОВЕРХОНЬ ОБЕРТАННЯ ЗА РАХУНОК КЕРУВАННЯ КОНТАКТОМ

У статті запропоновано нові принципи підвищення ефективності процесу та способи шліфування як ступінчастих, так і фасонних поверхонь обертання торцем абразивного інструмента чашкової форми. Зазначені способи дають змогу підвищити продуктивність та якість оброблених поверхонь за раціонального завантаження круга вздовж плями контакту. Зростання ефективності можливо досягти керуванням міжосьовою відстанню, вибором кута правки торця. Указане дозволяє збільшити розміри контакту і можливої подачі на рядок. Поліпшення якості зумовлене виділенням захищеної базової формотворної точки та появою шорсткості у вигляді сітки. Нові способи мають краю динаміку та дозволяють заощаджувати енергію завдяки коротшому термінові машинної обробки й використанню менших інструментів. У статті запропоновано вибір параметрів налаштування верстата із числовим програмним керуванням для забезпечення їхніх потрібних вихідних значень.

Ключові слова: точність, продуктивність, якість, ефективність, формоутворення, лінія контакту, кривизна поверхні, міжосьова відстань, профіль деталі, керування контактом.

Постановка проблеми. Підвищення продуктивності для покращення якості та енергозбереження є актуальною проблемою машинобудування, яка може бути вирішена за допомогою верстатів із числовим програмним керуванням (далі – ЧПК) у разі використання торцевого шліфування заправленим чашковим кругом. Це дає змогу керувати геометрією контакту за рахунок зміни відстані H між осями обертання деталі й інструмента.

Як відомо [1], підвищення продуктивності шліфування $Q = \iint V_n \cdot dS$ визначається збільшенням розмірів контакту S між інструментом та деталлю і швидкості V_n підведення припуску за рахунок відносного руху в напрямку нормалі (нормальної швидкості) на кожній елементарній ділянці у його межах. Рівняння для нормальної відносної швидкості було отримано автором та наведено у попередній роботі [8].

Для нових способів доведено [4; 5], що розміри контакту в Ейлеревих перетинах за наближення їхніх радіусів кривизни є значно більшими, а підведення припуску є більш раціональним [9].

Покращення якості забезпечують розподіленням функцій вздовж профілю інструмента з виділенням чорнової, захищеної чистової та фінішної ділянок стосовно наближення до місця очікуваного контакту номінальних поверхонь – базової точки. За рахунок наближення радіусів кривизни у напрямі осьової подачі можливо збільшити кіль-

кість проходів. Вектор швидкості різання вздовж контакту лежить під різними кутами до осі виробу, зумовлює шорсткість обробленої поверхні у вигляді сітки. Існують зустрічна та попутна схеми обробки інструментом, що обертається. Для попутної схеми характерна менша теплова напруженість, тому спостерігається краща стійкість, особливо в разі зменшення ширини контакту біля базової точки.

Динаміка процесу покращується за рахунок раціонального вектора коливаль, що лежить під кутом до оброблюваної поверхні, а зменшення маси інструмента та зростання розмірів контакту приводить до збільшення частоти власних коливань і величини демпфування. Енергозбереження можливо пояснити меншими розмірами інструмента і верстата, спрощенням приводу, зменшенням витрат машинного часу, викликаного збільшенням кількості проходів за скорочення холостого ходу. Крім того, впливає раціональне завантаження інструмента на рівень різальної здатності, що викликано характером залежності V_n [9].

Основні переваги нових способів обробки наведено на рис. 1.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблемою ефективного формоутворення поверхонь, зокрема обертання, за керування взаємною орієнтацією, зазвичай кутовою, займалися ряд вітчизняних учених, серед яких П.Р. Родін, Н.С. Равська, В.І. Кальченко [2; 3] та інші. Крім

того, спеціалістами фірми «ЮНКЕР» (Німеччина) було винайдено спосіб та ефективне обладнання для обробки ступінчастих валів [10].

ПЕРЕВАГИ НОВИХ СПОСОБІВ ШЛІФУВАННЯ			
Підвищення продуктивності	Покращення якості	Енергозбереження	
1. збільшення розмірів плями контакту.	1. розподілення функцій по ділянках.	МОЖЛИВІСТЬ використання менших верстату та кругу	
2. збільшення хвилинної подачі.	2. шорсткість у вигляді сітки.		спрощення приводу
3. раціональне підведення припуску	3. краща динаміка та теплова напруженість		зменшення часу обробки

Рис. 1. Переваги нових способів обробки порівняно із традиційними

У наукових роботах, присвячених порушеній темі, вказувалося, що кутове керування орієнтацією інструмента здатне значно підвищити продуктивність та якість обробки (дозволяє інструментом простої геометричної форми обробляти різноманітні поверхні). Однак на ефективність останньої значною мірою впливають форма круга та кінематика формоутворення. Ці питання в сучасній науковій літературі лише частково обґрунтовані, тому їх розв'язання потребує створення нового або значного удосконалення наявного обладнання.

Постановка завдання. Авторами статті було проаналізовано новий науковий підхід до підвищення ефективності процесу шліфування за рахунок керування міжосьовою відстанню [2; 3], що можливо використати для обробки як фасонних поверхонь обертання, так і ступінчастих. Запропоновано нові способи, захищені патентами України [6; 7]. Згаданий принцип є конкурентоспроможним порівняно з наявними, його можливо реалізувати на вітчизняному обладнанні у разі проведення незначної модернізації.

Метою статті є підвищення ефективності обробки поверхонь обертання за рахунок керування контактом, зумовленим зміною міжосьовою відстані. Слід теоретично дослідити нові високо-ефективні способи шліфування поверхонь обертання торцем абразивного інструмента чашкової форми та визначити вплив технологічних розмірів налашки на вихідні параметри точності.

Виклад основного матеріалу дослідження. Модель обробки запровадним конічним торцем на заточувальному верстаті із ЧПК мод. В3208Ф3 [4; 5], де забезпечується обертання деталі й інструмента

за відносних вертикальної, поздовжньої та поперечної подач, зображена на Рис. 2.

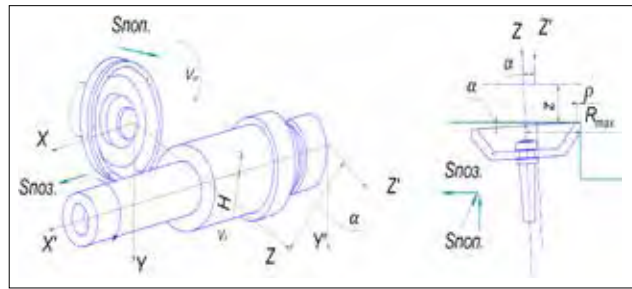


Рис. 2. Схема ефективного обробки ступінчастих валів торцем чашкового круга у процесі керування геометрією контакту за рахунок зміни відстані H між осями

Для точного формоутворення ділянки поверхні деталі слід у точці контакту витримати рівність нахилу дотичних, відповідність діаметральних розмірів та накласти умови на радіуси кривизни деталі в осьовій площині й інструмента. Під час обробки впалої ділянки профілю деталі у напрямку осьової подачі такими умовами є менші значення радіусу кривизни інструмента, що наближаються до необхідного значення відповідної ділянки заготовки. Ці вимоги можливо забезпечити раціональним вибором діаметральних розмірів круга, зміною значень кута α , що характеризує конус запровадненого торця, відносних вертикальної, поздовжньої та поперечної подач. За допомогою матриць перетворення систем координат (далі – СК) [1] побудовано [4; 5; 6; 8] математичні моделі поверхні круга та формоутворення на верстаті деталі з урахуванням значень можливого керування наявними подачами.

Формоутворення фрагмента поверхні на верстаті [1] можливо записати матричним рівнянням, враховуючи послідовні переходи між його ланками до системи координат деталі. Отримане рівняння має такий вигляд:

$$\vec{r}_{di}(\phi, z, x, \theta, \rho) = A^4(\phi) \cdot A^3(z) \cdot A^1(x) \cdot A^5(-\alpha) \cdot A^2(H) \cdot \vec{r}(\theta, \rho), \quad (1)$$

де $\vec{r}(\theta, \rho) = A^6(\theta) \cdot A^1(R_{max}) \cdot A^5(\alpha) \cdot A^1(-\rho) \cdot \vec{e}^4$ – радіус вектора торцевої конічної поверхні круга, $A^1(q) \dots A^6(q)$ – матриці 4×4 перетворення СК, q – деяка узагальнена координата; θ, ρ – криволінійні координати торцевої конічної поверхні інструмента, які відповідають за зміну радіального розміру відповідно до параметра ρ , що спрямований вздовж твірної конічної поверхні торця від більшого радіусу та кутового положення навколо осі інструмента; α – кутова орієнтація інструмента, який встановлений на колоні верстата і в

такому положенні проходить правку; R_{max} – максимальний радіальний розмір круга; z, x – координати, які відповідають за вертикальне та поздовжнє переміщення.

Указане рівняння дозволяє диференціюванням знайти як орт нормалі [1], так і відносну швидкість у СК інструмента, а також перенести її до СК деталі. Вперше у явному, функціональному вигляді отримано [5; 8] рівняння для знаходження швидкості підведення припуску по ділянках контакту в напрямку нормалі до поверхні інструмента, яке після перетворень має такий вигляд (Рис. 3):

$$V_n(\rho, \theta, H, z, s_r) = \omega \cdot \left\{ \left[H \cdot \sin^2 \alpha + \frac{\rho}{2} \cdot \sin 2\alpha + s_r \right] \cdot \cos \theta + \left[R_{max} \cdot \cos^2 \alpha - \rho \cdot \cos \alpha - z \cdot \sin \alpha \right] \cdot \sin \theta + \left[H \cdot \cos^2 \alpha - \frac{\rho}{2} \cdot \sin 2\alpha \right] \right\} \quad (2)$$

де $\omega = \frac{d\phi}{dt}$ – кутова швидкість; $S_r = \frac{S_0}{2\pi}$ – параметр гвинтового руху.

Для зручності у рівнянні (2) позначимо вирази у квадратних дужках при косинусі, синусі та вільні від кута θ через

$$\begin{aligned} CO(H, \rho) &= H \cdot \sin^2 \alpha + \frac{\rho}{2} \cdot \sin 2\alpha + s_r; \\ SI(z, \rho) &= R_{max} \cdot \cos^2 \alpha - \rho \cdot \cos \alpha - z \cdot \sin \alpha; \\ IO(H, \rho) &= H \cdot \cos^2 \alpha - \frac{\rho}{2} \cdot \sin 2\alpha. \end{aligned}$$

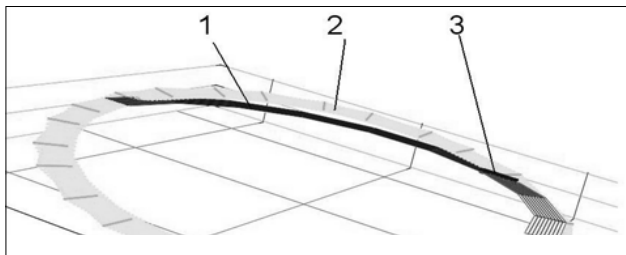


Рис. 3. Епюра навантажень V_n , викликаних підведенням припуску до інструмента

На Рис. 3 цифрами позначено: 1 – поверхня відліку, 2 – епюра зміни навантажень на поверхню торця V_n , 3 – характеристика $V_n = 0$.

Проведений аналіз рівняння зв'язку $\theta(\rho)$ (Рис. 3) доводить раціональний характер зміни навантажень вздовж контакту для нових способів, порівняно з відомими [5; 8]. Крім того, методика дозволяє враховувати вплив подач, чим переважно нехтують.

Рівняння зв'язку $\theta(\rho)$ між параметрами поверхні інструмента визначає місце дотику номінальних поверхонь – їхню лінію контакту $V_n = 0$.

З урахуванням прийнятих позначень її можливо записати, використовуючи таке тригонометричне рівняння:

$$\theta(\rho, H, z) = \arccos \frac{IO(H, \rho)}{\sqrt{(CO(H, \rho))^2 + (SI(z, \rho))^2}} + \operatorname{arctg} \frac{SI(z, \rho)}{ICO(H, \rho)} \quad (3)$$

Диференціювання лінії контакту за радіальним параметром ρ відповідає вектору $DE(\rho_b)$ дотичної. Знайдемо похідні рівняння зв'язку $\theta\rho$, θH від радіального параметра конічної поверхні ρ та від міжосьової відстані H , які з урахуванням позначень можливо записати, використовуючи допоміжну функцію $C(\rho, H, z)$ (Рис. 4):

$$\begin{aligned} \theta_\rho &= \frac{\partial \theta}{\partial \rho} = -H \cdot \cos \alpha \cdot C(\rho, H); \\ \theta_H &= \frac{\partial \theta}{\partial H} = -SI(\rho, z) \cdot C(\rho, H); \\ C(\rho, H, z) &= \frac{SI(\rho, z) \cdot \cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha \cdot \sqrt{(SI(\rho, z))^2 - H^2 \cdot \cos 2\alpha}}{(SI(\rho, z))^2 + H^2 \cdot \sin^4 \alpha} \cdot \sqrt{(SI(\rho, z))^2 - H^2 \cdot \cos 2\alpha} \quad (5) \end{aligned}$$

Рис. 4. Локальна геометрія контакту біля базової точки та схема до визначення кривизни конічної поверхні торця (отримані методом розрахунку в пакеті програм MathCAD)

Надалі для спрощеного вираження й аналізу зручніше буде користуватись позначеннями $\theta(\rho)$ та $\theta\rho$, θH , записаними у вигляді лінійного полінома, де коефіцієнти знаходять, мінімізуючи похибку заміни [5; 11]. За допомогою розрахунків доведено, що навіть за їх регулювання у широкому діапазоні така заміна може бути прийнятною з погляду точності обробки.

Знайдемо радіус кривизни фрагмента профілю.

Відомо [11], що для довільної гладкої поверхні, біля деякої (базової) точки, кривизну K_χ нормального перерізу визначають згідно з теоремою Ейлера:

$$K_\chi = K_1 \cdot \cos^2 \chi + K_2 \cdot \sin^2 \chi; \quad (6)$$

де χ – кут орієнтації навколо головної нормалі між ейлеревим та головним перерізами (Рис. 4); K_1, K_2 – головні нормальні кривизни, причому для конічної поверхні з кутом конусу α вони, відповідно, дорівнюють:

$$K_1 = 0, \quad K_2 = \frac{\sin \alpha}{[R_{max} - \rho \cdot \cos \alpha]} = \frac{\sin \alpha}{R_b}$$

Таким чином, кривизну конічної поверхні торця інструмента у площині контакту визначають:

$$K_\chi = \frac{\sin \alpha}{R_b} \cdot \sin^2 \chi; \quad (7)$$

У наведеному рівнянні невідомим є кут χ між характеристикою та твірною конічної поверхні,

який відповідає орієнтації навколо головної нормалі. Відомо [14], як визначають косинус кута χ між двома напрямками довільних кривих поверхні. Для конічної поверхні інструмента такими напрямками є радіальна твірна (перший) та дотична до характеристики (другий). Використовуючи коефіцієнти квадратичної форми [3], знаходять радіус кривизни фрагмента інструмента в нормальній ейлеревій площині, дотичній до характеристики, що утворює ділянку профілю деталі.

Однак нормальний переріз, який проходить через характеристику, є повернутим на кут ζ навколо головної нормалі деталі щодо її осьової площини. Тому кривизну утвореної ділянки профілю деталі можемо знайти за теоремою Ейлера [3]:

$$K_{\text{проф}} = \frac{K_{\chi} - K_{\text{об}} \cdot \sin^2 \zeta}{\cos^2 \zeta} \quad (8)$$

Головні ейлереві перетини деталі (Рис. 5) як поверхні обертання проходять через її вісь, а та, відповідно, через вектори нормалі та швидкості $\vec{V}_{\text{дi}}(H, z)$ кругової подачі. Косинус кута ζ між ними визначають через їх скалярний добуток:

$$\cos \zeta(H, z) = \frac{\vec{D}_E \cdot \vec{V}_{\text{дi}}}{|\vec{D}_E| \cdot |\vec{V}_{\text{дi}}|} \quad (9)$$

де довжину векторів дотичної та кругової подачі знаходять таким чином:

$$|\vec{D}_E(H, z)| = \sqrt{1 + (\theta'_{\rho} \cdot R_{\sigma})^2} = \frac{1}{\cos \chi} \quad ; \quad (10)$$

$$|\vec{V}(H, z)| = \omega \cdot \vec{r}_{\sigma}(H, z) \times \vec{i}$$

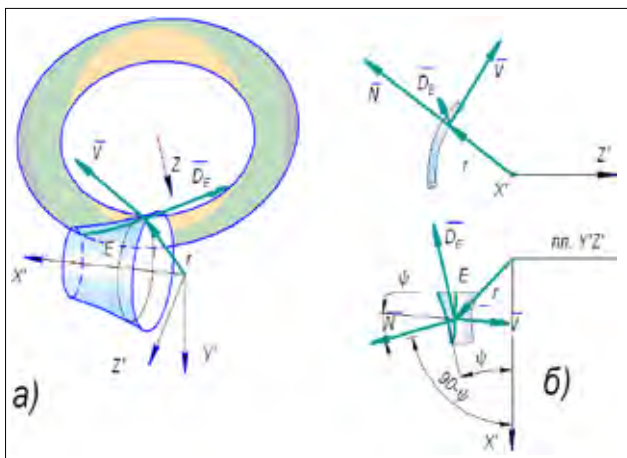


Рис. 5. Схема для знаходження кута нахилу та кривизни ділянки профілю деталі:
а) розташування векторів \vec{D}_E, \vec{V} , дотичних до характеристики E та напрямної деталі;
б) визначення нормалі \vec{N} до поверхні деталі та кута ψ нахилу ділянки профілю

Визначимо вплив зміни розміру між осями H на діаметральний.

Знайдемо повний диференціал виразу, після інтегрування якого за період зміни міжосьової відстані H у межах $[H_0, H_1]$ можливо визначити кривизну K_2 та характер зміни профілю обробленої поверхні.

Кут нахилу ψ ділянки профілю, що утворюється до осі деталі, визначають таким чином:

$$\cos(90^\circ - \psi) = \sin \psi = \vec{n} \cdot \vec{i} \approx \psi \quad ,$$

або

$$\sin \psi = \frac{\vec{D}_E \times \vec{V}_{\text{дi}}}{|\vec{D}_E| \cdot |\vec{V}_{\text{дi}}|} \cdot \vec{i} \quad (11)$$

Тут векторний добуток визначає орт нормалі до площини, дотичної до фрагмента поверхні деталі.

Ефективну обробку ступінчастих циліндричних поверхонь валів також можливо проводити, використовуючи керування міжосьовою висотою (отримано патент України на спосіб шліфування [6]).

Круг працює у режимі глибинного шліфування, яке забезпечує значні розміри контакту та завантаження його профілю. Таким чином, за один робочий хід можливо проводити багатопрхідну обробку, як це, наприклад, здійснено на верстаті «Quickpoint 1002» E. Junker [10; 11].

Таким же чином виділено формотворну ділянку інструмента (Рис. 6).

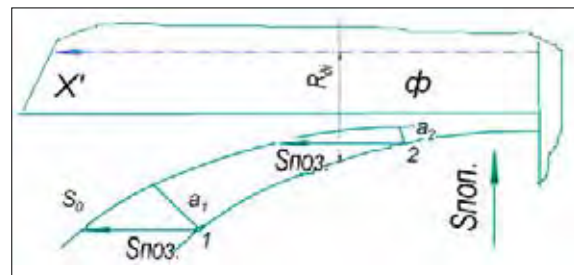


Рис. 6. Зменшення товщини зрізів a_1 та a_2 вздовж профілю круга у бік формотворної точки Φ між сусідніми поверхнями різання для утворення фрагмента деталі

Профіль деталі отримують комбінацією подач: радіальної для обробки фасонного профілю або торця та поздовжньої для циліндричного ступеня. Для кожного ступеня, торці яких спрямовані в один бік, послідовно проводять урізне та поздовжнє глибинне шліфування. Під час обробки одного ступеня, в міру наближення до нього, для збільшення радіусу кривизни міжосьову відстань зменшують. Таким чином можливо обробляти вали з однаковим напрямком ступенів.

Для обробки протилежно спрямованих торців ступенів вісь шліфувального круга слід дзеркально повернути щодо площини обертання деталі.

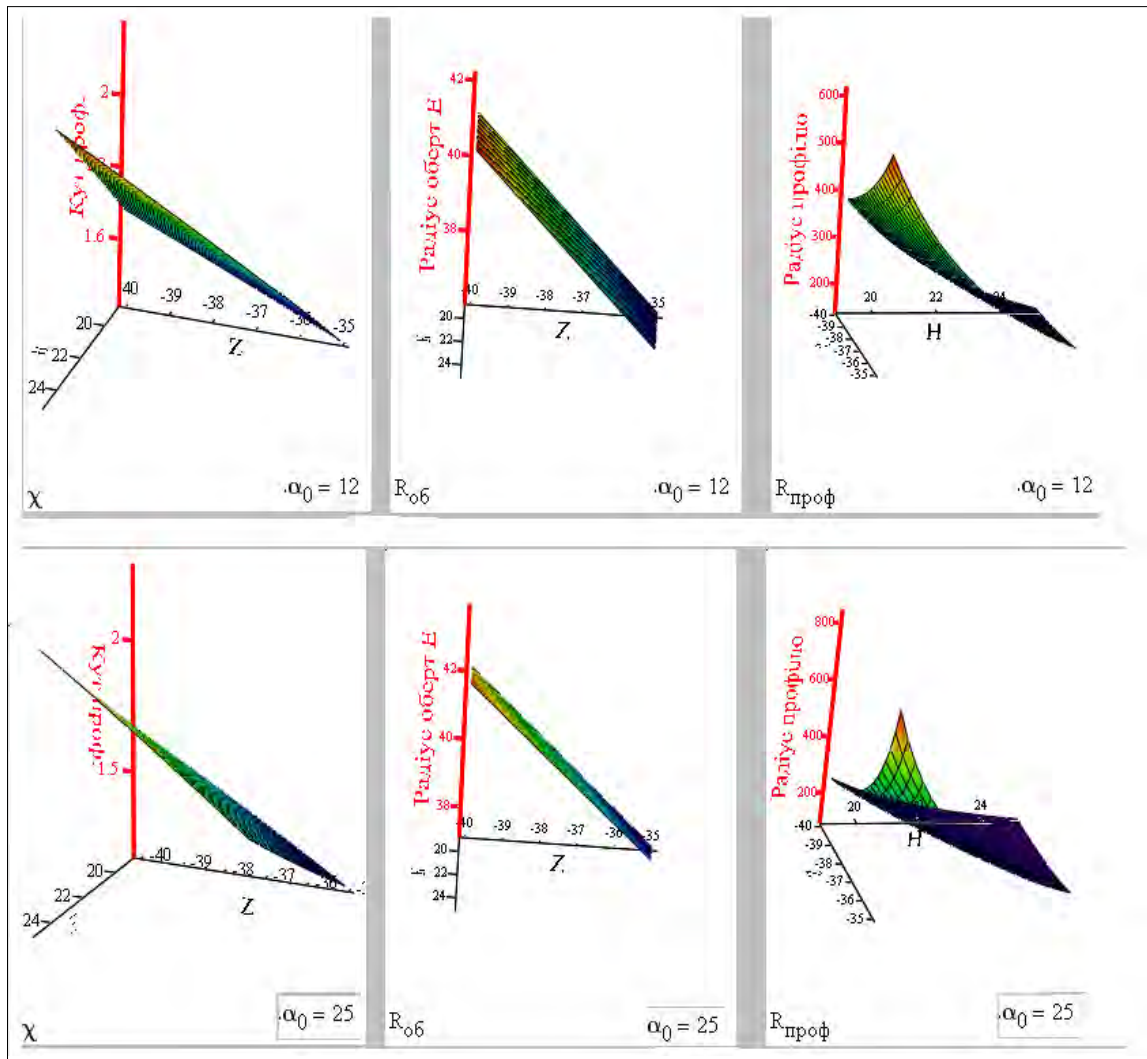


Рис. 7. Зміна профілю заготовки за шириною рядка при кутах правки круга $\alpha = 12^\circ$ та $\alpha = 25^\circ$ залежно від відстаней міжосьової H та z

Режими шліфування визначають аналогічно до урізних методів згідно з відомою методикою [9]. Вочевидь доцільно, як це виконують на верстаті «Quickpoint» фірми «Junker maschinen», проводити швидке обертання деталі для збільшення хвилинної подачі. Якість торців ступенів, як і під час шліфування тарілчастими кругами, виходить кращою, без припалів, порівняно з обробкою торцем круга.

Висновки. Отримана система рівнянь та робочих програм дають змогу з урахуванням усіх кінематичних складників визначити режимні параметри та товщину зрізів для навантаження інструмента до рівня, який визначається різальною здатністю.

Матеріали теоретичних досліджень, розрахунків та їх порівняння доводять можливість зна-

чного збільшення ефективності обробки шліфуванням поверхонь обертання, спрямованого на конус торцем круга.

Завдання вибору всіх потрібних параметрів оптимізації χ , $R_{об}$, $R_{проф}$ у межах рядка є багатоваріантним, а точність дотримання факторів (H , Z , α , D) забезпечується верстатом і вибором інструмента. Слід зробити раціональний вибір діаметрального розміру інструмента та кута його правки α з урахуванням заданих розмірів деталі.

Усі залежності параметрів оптимізації є взаємопов'язаними. Так забезпечується широкий діапазон їх регулювання.

Результати роботи можуть бути впровадженими на наявному обладнанні після незначної модернізації.

Список літератури:

1. Решетов Д.Н., Портман В.Т. Точность металлорежущих станков. Москва, 1986, 336 с.
2. Кальченко В.И. Научные основы шлифования криволинейных поверхностей с управляемой ориентацией абразивного инструмента: дис. ... докт. техн. наук: 05.03.01. Харьков, 1994. 329 с.
3. Равська Н.С., Родін П.Р., Ніколаєнко Т.П., Мельничук П.П. Основи формування поверхонь під час механічної обробки. Житомир, 2000, 163 с.
4. Рудик А.В., Рудик В.А. Формування поверхонь обертання торцем круга чашкової форми. Вісник Херсонського національного технічного університету. 2016. № 1(56). С. 77–83.
5. Пат. 117066 Україна МПК В24В5/04. Спосіб шліфування ступінчастих поверхонь обертання кінчними поверхнями абразивного інструмента. Заявл. № u201700546 В24В 5/04. Пріоритет від 20.01.2017.
6. Пат. № 92147 Україна МПК В24В5/04. Спосіб шліфування впалих поверхонь обертання кінцевою поверхнею торця абразивного інструмента. Заявл. № u201310754 В24В 5/04. Пріоритет від 06.09.2013.
7. Рудик А.В., Венжега В.І. Продуктивність високоефективного поздовжнього та глибинного шліфування поверхонь обертання периферією та торцем орієнтованим абразивним інструментом. Вісник Чернігівського національного технологічного університету. 2014. № 72. С. 76–80.
9. Рудик А.В., Следнікова О.С., Подзолкіна А.П., Куций О.Л. Вибір режимів ефективного шліфування поверхонь обертання. Вісник Чернігівського національного технологічного університету. 2016. № 4(6). С. 62–70.
10. Quickpoint. Все в одном закреплении: Erwin Junker: Maschinenfabrik Gmbh, Junkerstraße 2. Postfach 25. D 77787. Nordrash, 2006. 12 p.
11. Рудик А.В., Пасов Г.В., Венжега В.І., Рудик В.А. Ефективне шліфування ступінчастих поверхонь на верстаті з ЧПК моделі В3208Ф3. Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем: матеріали VII міжнар. наук.-практ. конф. (Чернігів, 24–26 квітня 2017 р.). Чернігів, 2017. С. 60–62.
12. Рудик А.В., Венжега В.І., Пасов Г.В. Дослідження теплової напруженості обробки торцевих поверхонь на верстаті 3342 АДО. Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем: матеріали VI міжнар. наук.-практ. конф. (Чернігів, 26–29 квітня 2016 р.). Чернігів, 2016. С. 60–62.
13. Рудик А.В., Рудик В.А. Ефективне формування поверхонь обертання торцем круга. Технічні науки та технології. 2017. № 4(10). С. 33–43.
14. Корн М. Справочник по математике для научных работников и инженеров. Москва, 1985. 720 с.

**ЭФФЕКТИВНОЕ ШЛИФОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ ВРАЩЕНИЯ
ЗА СЧЕТ УПРАВЛЕНИЯ КОНТАКТОМ**

В статье предложены новые принципы повышения эффективности процесса и способы шлифования как ступенчатых, так и фасонных поверхностей вращения запрограммированным на конус торцом абразивного инструмента чашечной формы. Указанные способы позволяют повысить производительность и качество обработанных поверхностей при рациональной загрузке круга вдоль пятна контакта. Повышения эффективности возможно достигнуть управлением межосевым расстоянием, выбором угла правки торца, что позволяет увеличить размеры контакта и возможную подачу на строку. Улучшение качества обусловлено выделением защищенной базовой формообразующей точки и появлением шероховатости в виде сетки. Новые способы имеют лучшую динамику и позволяют экономить энергию вследствие меньшего времени машинной обработки и использования менее габаритных инструментов и станка. В статье предоставлен выбор зависимостей параметров наладки станка с числовым программным управлением с целью обеспечения их необходимых выходных значений.

Ключевые слова: *точность, производительность, качество, эффективность, формообразование, линия контакта, кривизна поверхности, междуосевое расстояние, профиль детали, управление контактом.*

EFFECTIVE GRINDING OF ROTATION SURFACES BY THE CONTACT CONTROL

Having considered the proposals for new ways of grinding as a shaped rotation, surfaces such as the step of the refilled tapered butt end abrasive tool forms the cup. The method allows increasing both productivity and the quality of the treated surfaces at a rational loading of the working surface of the wheel along the contact patch. Efficiency gains can be achieved by controlling the center distance, choosing the angle changes end. This allows you to increase the size of the contact and the possibility of per line. Quality improvement is due to secure the release of the base forming the point of roughness and the appearance of a grid. New ways to have better dynamics and saves energy due to less time machining and use less of dimensional tool and machine tools. The article contains a selection of dependencies of the setup parameters of the CNC machine to ensure their desired output values.

Key words: *accuracy, productivity, quality and efficiency, shape formation, contact line, curvature of the surface, distance between axes, details profile, contact control.*

ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ У МАШИНОБУДУВАННІ

УДК 539.3

Лавінський Д.В.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Морачковський О.К.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

АНАЛІЗ ДЕФОРМУВАННЯ КОНСТРУКЦІЙ ДЛЯ ПРЕСУВАННЯ ПОРОШКІВ У РАЗІ ДІЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ

У роботі поставлено задачу проаналізувати деформування складених конструкцій, які використовуються для пресування порошкових матеріалів. Розглянуто можливість сумісного використання традиційного псевдоізостатичного пресування та електромагнітного пресування. Чисельним методом розв'язання використовується метод скінчених елементів. Наведено результати розрахунків, що ілюструють розподіл інтенсивності магнітного поля та інтенсивності напружень. Проведено серію розрахунків, у яких вивчено вплив зовнішнього електромагнітного поля на напружено-деформований стан елементів прес-форми.

Ключові слова: складені конструкції, пресування порошкових матеріалів, електромагнітне поле, напружено-деформований стан, метод скінчених елементів.

Постановка проблеми. Останніми роками все більша кількість технологічних операцій пов'язана із пресуванням порошкових матеріалів (ПМ). ПМ є сировиною для одержання як заготовок, так і готових виробів. Відомо, що конструкційні матеріали, які одержують з ПМ, практично не поступаються за механічними характеристиками матеріалам, які одержують традиційними способами (наприклад, литвом) [1]. Велика кількість технологічних процесів пресування (ущільнення) ПМ стосується обробки високоактивних відходів із метою їх подальшої утилізації. Один з напрямів передбачає пресування нових виробів з порошків тугоплавких сполук типу карбиду вольфраму, кобальту, нікелю. Ефективним процес пресування може бути тільки у разі підвищених температур. Так, за температури оброблюваного порошку $\sim 1800^{\circ}\text{C}$ і питомих тисках 30-40 МПа пресування може проводитися в матрицях з тугоплавких матеріалів. Для підвищення щільності готових виробів необхідно інтенсифікувати процес пресування шляхом збільшення тиску пресування. При цьому зростає навантаження на технологічне оснащення. Збільшення тиску пресування в цьому разі призводить до руйнування матриць з тугоплавких матеріалів, що вимагає використання матеріалів з підвищеними характеристиками міцності. За рівнів тиску 40-100 МПа можна використовувати для матриці вуглець-вуглецевий композиційний мате-

ріал – ВВКМ, який має високі механічні властивості у разі підвищених температур [2; 3].

У роботах [4; 5] наведено розрахункову схему прес-форми та надано постановку задачі аналізу напружено-деформованого стану (НДС) складеної прес-форми з ВВКМ, наведені результати розрахунків. Згідно з цими результатами можна стверджувати, що основні елементи прес-форм для обробки порошків високоміцних тугоплавких матеріалів (пуансони і матриця) є високонавантаженими конструкційними елементами, причому рівні напружень у них близькі до небезпечних, особливо це стосується матриці. Основним джерелом навантаження матриці є контактний тиск з боку вкладиша, який діє в радіальному напрямку. Підвищення довговічності матриці, очевидно, може бути досягнуто шляхом зниження цього радіального тиску. Також було виявлено, що вкладиш, який формує зовнішню поверхню виробу, набуває значних радіальних переміщень.

Основним джерелом навантаження вкладиша і матриці є радіальний тиск пресування, якщо в процесі пресування створити тиск, який діє на заготовку в протилежному напрямку (що забезпечує радіальне стиснення заготовки), то тоді знизиться навантаженість вкладиша і матриці. Створити такий стискаючий радіальний тиск можна, якщо використовувати енергію наведеного електромагнітного поля

(ЕМП), що розвивається зовнішнім індуктором. У цьому разі це можна реалізувати, якщо розмістити з боку зовнішньої поверхні матриці циліндричний спіральний багатовитковий індуктор. Застосування подібних індукторів широко поширене як у традиційних технологіях МІОМ, коли оброблювана заготовка розташована всередині індуктора (тут вплив класифікується за схемою «обтискання» [6]), так і у магнітно-імпульсному пресуванні порошкових матеріалів [1; 7; 8], коли електромагнітні сили діють безпосередньо на оброблюваний порошок.

Постановка завдання. Розглянемо розрахункову схему прес-форми із зовнішнім індуктором, яка може мати вигляд, наведений на рис. 1. У цьому разі електромагнітні сили, що розвиваються індуктором, будуть спрямовані до осі Oz вздовж радіуса. Зовнішній спіральний багатовитковий індуктор з ізоляцією на основі азбесту, струмопровід – з міді. Товщина ізоляції індуктора – $H=8$ мм, переріз струмопроводу – прямокутник 3 на 4 мм. Кількість витків струмопроводу варіюється. Прес-форма має такі розміри: $d_1=340$ мм, $d_3=340$ мм, $L=340$ мм. Вироби можуть мати різну висоту (l), яка задається відносно висоти прес-форми (L). Навантаженість вкладиша і матриці залежить від співвідношення їх товстостінностей, які можна визначити відношенням зовнішнього діаметра вкладиша (d_2) до зовнішнього діаметра матриці (d_3) у фіксованому діаметрі пресованого

виробу (d_1). Результати розрахунків за ізостатичного пресування [4; 5] свідчать, що найбільш навантаженими елементами прес-форми є у разі: $l/L = 0,550$ та $d_2/d_3=0,850$, тому подальші розрахунки проводились саме за цих співвідношень.

У таблицях 1 і 2 наведені фізико-механічні характеристики матеріалів ізоляції та струмопроводу індуктора, а також електрофізичні характеристики матеріалу елементів прес-форми та індуктора, які використовувалися в розрахунках.

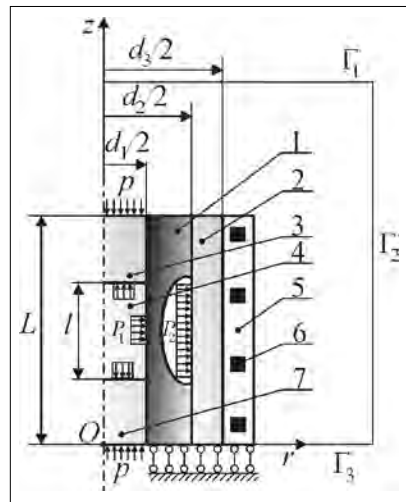


Рис. 1. Розрахункова схема пристрою з індуктором для пресування порожнистих виробів з порошків: 1 – вкладиш; 2 – матриця; 3, 7 – пуансони; 4 – брикет з порошку; 5 – ізоляція індуктора; 6 – струмопровід індуктора

Таблиця 1

Фізико-механічні характеристики матеріалу елементів прес-форми

	Пуансони (ВВКМ)	Матриця (ВВКМ)	Вкладиш (графіт АРВ-1)	Ізоляція (азбест)	Струмопровід (мідь)
E , ГПа	18	18	10,5	200	180
ν	0,19	0,19	0,2	0,2	0,33
σ_T , МПа	–	–	–	–	200
σ_B , МПа	–	–	–	700	–
$(\sigma_t)_B$, МПа	100	100	15	–	–
$(\sigma_c)_B$, МПа	110	110	51,5	–	–
α_T , $1/^\circ\text{C}$	$3,5 \cdot 10^{-6}$	$3,5 \cdot 10^{-6}$	$6 \cdot 10^{-6}$	$2,5 \cdot 10^{-6}$	$3,5 \cdot 10^{-6}$
ρ , кг/м^3	1500	1500	1600	2400	1500
λ , $\text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$	130	130	120	0,05	130
c , $\text{Дж/(кг}\cdot\text{К)}$	1700	1700	1700	1050	1700

Таблиця 2

Електрофізичні характеристики матеріалу елементів прес-форми і індуктора

	Матриця, пуансони (ВВКМ)	Вкладиш, центральний стрижень (графіт АРВ-1)	Заготовка (карбід вольфраму)	Ізоляція (азбест)	Струмопровід (мідь)
γ , $1/(\text{Ом}\cdot\text{см})$	$0,372 \cdot 10^7$	$0,372 \cdot 10^7$	$0,522 \cdot 10^7$	0	$7 \cdot 10^7$
μ_r	1	1	1	1	1

Поведінка матеріалів складових частин прес-форми та ізоляції індуктора приймається в рамках пружної моделі, матеріал струмопроводу розглядаємо в рамках пружно-пластичної моделі.

На першому етапі вирішувалося завдання аналізу розподілу векторних компонент ЕМП. Тут прес-форма розглядалася спільно з навколишнім середовищем, на межах Г1, Г2 і Г3 задавалися нульові значення окружної компоненти векторного магнітного потенціалу, що моделює загасання ЕМП на віддаленні від джерела поля. Як джерело поля приймався струм, рівномірно розподілений по перетину витка струмопроводу, в часі густина струму приймалася за законом: $j(t) = I_m e^{-\delta 2\pi ft} \cdot \sin(2\pi ft)$, де амплітуда сили струму – $I_m = 30$ кА, частота – $f = 2$ кГц, відносний коефіцієнт загасання – $\delta = 0,3$.

Повна постановка задачі пружно-пластичного деформування контактної взаємодіючих систем тіл у разі дії ЕМП та метод розв'язання, що спирається на метод скінчених елементів (МСЕ), наведені у роботах [9–11], у роботах [10;11] наведено варіаційну постановку задачі, а також підхід до визначення електромагнітних сил, який базується на принципі віртуальної роботи. Моделювання контактної взаємодії проводилось відповідно до рекомендацій, представлених у [12].

Задача розв'язувалась у два етапи: спочатку визначалися просторово-часові розподіли основних компонент ЕМП, які потім використовувалися для визначення вузлових значень електромагнітних сил; далі проводилося визначення тензорно-векторних компонент НДС у квазістаціонарному наближенні, тому що в цьому разі впливом нестационарності ЕМП можна знехтувати. Це твердження ґрунтується на особливостях геометрії конструктивних елементів прес-форми, заготовки та індуктора – всі вони є досить масивними, а отже, мало схильними до можливості виникнення коливальних процесів.

Аналіз одержаних результатів. На рис. 2 наведені графіки розподілу дотичного складника напруженості магнітного поля уздовж внутрішньої поверхні вкладиша залежно від кількості витків струмопроводу в індукторі. Як відомо, узагальнений магнітний тиск пропорційний квадрату дотичного складника напруженості магнітного поля, а отже, розглядаючи просторову зміну цієї величини, можна зробити якісний прогноз про силову дію ЕМП на заготовку. З аналізу графіків можна зробити висновок, що найбільші значення напруженості спостерігаються в околі середини висоти вкладиша прес-форми, отже, саме тут будуть

виникати максимальні електромагнітні сили, спрямовані на стиск заготовки і, як наслідок, ці сили будуть знижувати радіальний тиск на елементи прес-форми. Таким чином, подібне розташування індуктора є в цьому разі обґрунтованим.

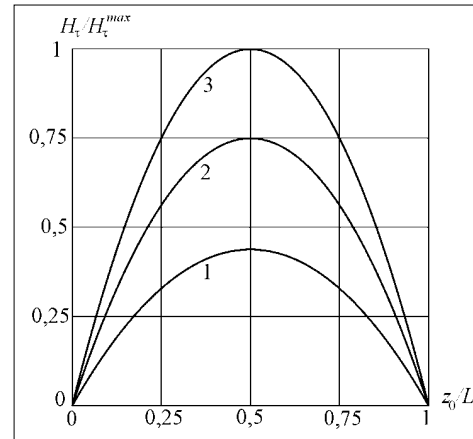


Рис. 2. Розподіл дотичного складника напруженості магнітного поля уздовж внутрішньої поверхні вкладиша за різної кількості витків струмопроводу індуктора: 1 – три витки, 2 – 6 витків, 3 – 9 витків

Збільшення кількості витків струмопроводу призводить (за незмінних розмірів перетину витка і незмінної амплітуди сили струму) до збільшення напруженості. Так, збільшення кількості витків з трьох до дев'яти призводить до збільшення напруженості приблизно на 110%, що, в свою чергу, призведе до збільшення рівнів електромагнітних сил. Отже, можна підвищувати ефективність електромагнітного впливу в цьому разі шляхом збільшення кількості витків, не збільшуючи амплітудні значення сили струму.

Перш ніж перейти до аналізу НДС елементів прес-форми, розглянемо питання, які стосуються температурного впливу в цьому разі. Перш за все необхідно враховувати, що прес-форма розглядається нагрітою до температури 1800°C, індуктор стикається із зовнішньою поверхнею матриці і можлива (в загальному випадку) теплопередача, яка може викликати нагрівання струмопроводу, а отже, знизити його електропровідність. Але в цьому разі ми розглядаємо ізоляцію індуктора на основі азбесту, а цей матеріал є також гарним термоізолятором (коефіцієнт теплопровідності 0,05 Вт/(м·К)), отже, очевидно, підвищена температура прес-форми не викличе значного нагрівання струмопроводу. Також відомо, що за протікання електричного струму в провіднику відбувається тепловиділення, але в цьому разі тепло, яке виділяється, внаслідок обставин, викладених вище, не впливатиме на температурне поле прес-форми, і в

подальшому аналізі НДС може не враховуватися. На рис. 3 показано часову залежність температури в центральній точці перетину струмопроводу індуктора. Видно, що за період часу, відповідний чотирьом імпульсам, відбувається нагрів на 120 градусів, чим у подальшому ми нехтуємо.

Потрібно відзначити, що температура струмопроводу монотонно зростає з плином часу, а високі термоізоляційні властивості азбесту перешкоджають відведенню тепла, відповідно, у разі безперервної роботи індуктора температура струмопроводу може досягти рівнів температури плавлення міді. Але цей факт зумовлений деякими особливостями такої вісесиметричної постановки завдання. Фактично розглядається дев'ять ізольованих один від одного замкнутих кілець і процес тепловідведення в такій постановці не може бути змодельований у принципі. У реальних конструкціях індукторів подібного типу й інших моделей, по-перше, відсутні ізольовані замкнуті кільця (найчастіше індуктор – це спіраль), а по-друге, є вивід струмопроводу, до якого можна підключати охолоджуючі елементи.

Перейдемо до аналізу деформування складників прес-форми сумісно із зовнішнім індуктором. На рис. 4 і 5 представлені розподіли інтенсивності напружень у прес-формі та індукторі. Найбільші напруження діють у центральних витках індуктора, причому за даної амплітуди сили струму (30 кА) вони становлять ~115 МПа, тобто відбувається пружне деформування, максимальні величини інтенсивності напружень в ізоляції індуктора незначні (порівняно з межею міцності азбесту), вони не перевищують 65 МПа. Рівні інтенсивності напружень у матриці знижуються приблизно на 27% порівняно з ізо статичним пресуванням [4; 5], причому найбільше зниження відбувається в центральній частині матриці, де, як було встановлено раніше, діють найбільші за величиною електромагнітні сили. Відзначимо, що найбільш навантаженими елементами прес-форми в цьому разі стають пуансони, але максимальна інтенсивність напружень (~ 70 МПа) тут не перевищує межу міцності для ВВКМ на розтягнення, і пуансони залишаються працездатними.

Як відомо, зі збільшенням амплітуди сили струму відбувається збільшення значень електромагнітних сил, що в технологічних системах, подібних розглянутій, призведе до зниження рівнів напружень в елементах прес-форм. Для складання кількісних оцінок була проведена серія розрахунків, в яких варіювалося значення амплітуди сили струму, що діє в індукторі. Виявилось, що за під-

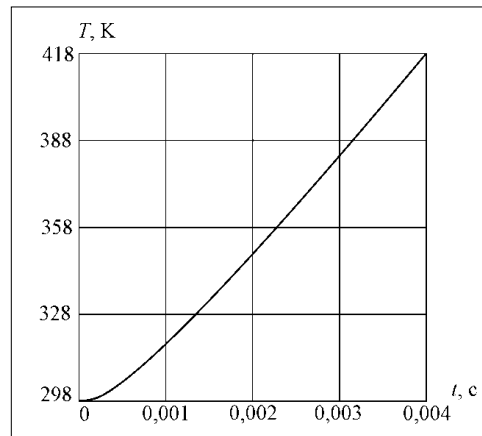


Рис. 3. Часова залежність температури в центрі перетину витка струмопроводу

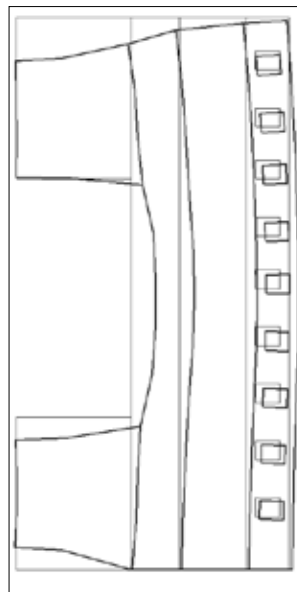


Рис. 4. Змінений стан прес-форми

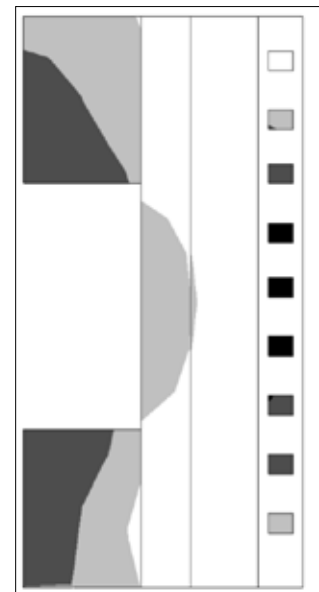


Рис. 5. Якісний розподіл інтенсивності напружень у прес-формі

вищення амплітуди відбувається значне зниження максимальних значень інтенсивності напружень у матриці. Так, у разі збільшення сили струму з 30 до 40 кА максимальна інтенсивність напружень у матриці знижується приблизно на 10%, така ж тенденція зберігається і у подальшому збільшенні сили струму.

Однак збільшення сили струму призводить також до збільшення електромагнітних сил, що діють на струмопровід індуктора: за збільшення амплітуди сили струму з 30 до 40 кА максимальна інтенсивність напружень зростає приблизно на 30%. У перевищенні силою струму величини 50 кА інтенсивність напружень перевищує межу текучості міді і в матеріалі струмопроводу з'являються зони пластичних деформацій. Тому

для індуктора з розглянутими геометричними розмірами струмопроводу використання сили струму більше 50 кА небажано.

Висновки. У роботі запропоновано використання сумісного ізостатичного та електромагнітного пресування порошків тугоплавких сполук у матрицях, виконаних з вуглець-вуглецевих композитних матеріалів. Із використанням методу скінчених елементів визначені просторово-часові розподіли основних компонентів електромагнітного поля. Вплив електромагнітного поля на процес деформування враховано шляхом введення розподілених електромагнітних сил.

У квазістационарному наближенні проведено аналіз деформування основних елементів прес-форми.

Загалом, для розглянутої технологічної операції слід відзначити позитивний ефект у результаті застосування способу електромагнітної обробки матеріалів спільно із ізостатичним пресуванням. Спостерігається зниження навантаженості основного елемента прес-форми – матриці. Для визначення раціональних експлуатаційних параметрів проведено серію розрахунків, у яких вивчалась залежність інтенсивності напружень від величини амплітуди сили струму.

Список літератури:

1. Mamalis A. G., Manolakos D.E., Kladas A.G., Koumoutsos A.K. Electro-magnetic tooling for metal forming and powder compaction: numerical simulation. High Speed Forming: Proceedings of the 1st International Conference. 2004. P. 143–154.
2. Бушуев Ю.Г., Персин М.И., Соколов В.А. Углерод-углеродные композиционные материалы. М.: Металлургия, 1994. 128 с.
3. Нагорный В.Г., Котосонов А.С., Островский В.С. Свойства конструкционных материалов на основе углерода: Справочник. М.: Металлургия, 1975. 335 с.
4. Бирюков О.В., Колосенко В.В., Саенко С.Ю., Лавинский Д.В., Морачковский О.К., Соболев В.Н. Статистический анализ прочности конструктивных элементов пресс-форм для прессования изделий из порошков. Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». 2006. № 32. С. 28–32.
5. Ашихмин В.П., Бирюков О.В., Гурин В.А., Затолока Б.Б., Колосенко В.В., Саенко С.Ю., Лавинский Д.В., Морачковский О.К. Анализ прочности элементов пресс-форм из углерод-углеродных материалов для псевдоизостатического прессования. Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. 2007. № 6 (91). С. 120–123.
6. Белый И.В., Фертик С.М., Хищенко Л.Т. Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов. Харьков: Вища школа, 1977. 189 с.
7. Миронов В.А. Прогрессивные способы производства деталей машин и приборов из порошковых материалов. Рига: Зинатне, 1974. 87 с.
8. Миронов В.А. Магнитно-импульсное прессование порошков. Рига: Зинатне, 1980. 196 с.
9. Лавинський Д.В., Морачковський О.К. Пружно-пластичне деформування систем тіл при дії електромагнітних полів. Вісник Запорізького національного університету: Фізико-математичні науки. 2015. № 2. С. 125–135.
10. Altenbach H., Morachkovsky O., Lavinsky D., Naumenko K. Inelastic deformation of conductive bodies in electromagnetic fields. Continuum Mechanics and Thermodynamics. 2016. Vol. 28. No. 5. P. 1421–1433.
11. Lavinskii D.V., Morachkovskii O.K. Elastoplastic Deformation of Bodies Interacting Through Contact Under the Action of Pulsed Electromagnetic Field. Strength of materials. 2016. –Vol. 48. No. 6. P. 760–767.
12. Lavinskii D.V., Bondar' S.V. Study of thermoelastoplastic contact deformation of production tooling mixed structures. Strength of materials. 2011. Vol. 43. No. 4. P. 447–454.

АНАЛИЗ ДЕФОРМИРОВАНИЯ КОНСТРУКЦИЙ ДЛЯ ПРЕССОВАНИЯ ПОРОШКОВ ПРИ ДЕЙСТВИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

В работе поставлена задача проанализировать деформирование составных конструкций, использующихся для прессования порошковых материалов. Рассмотрена возможность совместного использования традиционного псевдоизостатического прессования и электромагнитного прессования. В качестве цифрового метода решения используется метод конечных элементов. Приведены результаты расчетов, иллюстрирующие распределение напряженности магнитного поля и интенсивности напряжений. Проведена серия расчетов, в которых изучено влияние внешнего электромагнитного поля на напряженно-деформированное состояние элементов пресс-формы.

Ключевые слова: составные конструкции, прессование порошковых материалов, электромагнитное поле, напряженно-деформированное состояние, метод конечных элементов.

**THE DEFORMATION ANALYSIS OF STRUCTURES
FOR POWDER COMPACTION UNDER ELECTROMAGNETIC FIELD ACTION**

The problem statement of the compound structures deformation for powder compaction is given in this article. The capability of the joint use of traditional pseudoisostatic compaction and electromagnetic compaction is considered. The finite element method is used as numerical method of solution. It is given the numerical results, which show the magnetic field intensity and equivalent stress distribution. The influence of external electromagnetic field on stress-strain state of press-molding elements is studied under the number of numerical investigations.

Key words: *compound structures, powder compaction, electromagnetic field, stress-strain state, finite element method.*

АВІАЦІЙНА ТА РАКЕТНО-КОСМІЧНА ТЕХНІКА

УДК 629.7.03:681.5.03(045)

Єнчев С.В.

Національний авіаційний університет

Таку С.О.

Національний авіаційний університет

РОЗРОБКА АДАПТИВНОГО НЕЙРОМЕРЕЖЕВОГО РЕГУЛЯТОРА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ АВІАЦІЙНИМ ДВИГУНОМ

Проведено аналіз можливих схем включення нейронних мереж у системах автоматичного керування авіаційних двигунів, у результаті якого виявлено переваги та недоліки основних способів побудови систем керування двигунами з нейромережевими регуляторами. Розроблено алгоритм структурного синтезу багаторежимного нейромережевого регулятора ГТД на основі принципу мінімальної складності. Запропоновано узагальнення алгоритму структурного синтезу багаторежимних нейромережеских регуляторів на випадок багатовимірної системи керування ГТД. Показано, що застосування цього алгоритму дає змогу обґрунтовано вибрати клас одновимірних і багатовимірних структур нейромережеских регуляторів мінімальної складності.

Ключові слова: авіаційний двигун, інтелектуальна система автоматичного керування, нейронна мережа, регулятор, навчання.

Постановка проблеми. Відмінними ознаками сучасних авіаційних двигунів (далі – АД) є потреба одночасного регулювання одразу декількох вихідних параметрів, широкий діапазон зміни динамічних характеристик, зміна якісного та кількісного складу підсистем керування в процесі функціонування, нелінійність і нестационарність АД [1, с. 16]. Все це призводить до суттєвого ускладнення законів керування АД та, відповідно, систем автоматичного керування (далі – САК) з одночасним підвищенням вимог до якості і надійності їх функціонування, зручності їх експлуатації.

Одним з нових перспективних напрямів у галузі автоматичного керування є застосування інтелектуальних систем керування на основі штучних нейронних мереж (далі – НМ). Основна перевага такої системи керування полягає у використанні таких властивостей НМ, як можливість апроксимації довільних нелінійних залежностей [1, с. 16; 2, с. 181].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні методи багаторежимного керування АД беруть свій початок у працях таких учених, як: А.А. Шевяков, Б.А. Черкасов, О.С. Гуревич, В.І. Васильєв, В.Г. Кримський [3, с.10]. Інтелектуальним системам керування та прийняття рішень на основі НМ

присвячені роботи таких учених: С. Наренда, С. Омату, Р. Юсуф, В.А. Терехов, А.В. Тимофєєв.

Постановка завдання. Разом з тим аналіз сучасної літератури з нейронних мереж та нейромережеских систем керування [4, с. 39; 5, с. 86; 6, с. 57] вказує, що до цих пір не вирішені питання, пов'язані з розробкою алгоритмів і методик ідентифікації нелінійних об'єктів на основі нейромережеских моделей, синтезу структури і алгоритмів адаптації (навчання) параметрів нейромережеских регуляторів. Тому сформулюємо основне завдання дослідження – розробка адаптивного нейромережевого регулятора інтелектуальної системи автоматичного керування авіаційними газотурбінними двигунами.

Математичний опис роботи АД. Будемо вважати, що динаміка АД як об'єкта керування описується диференціальним рівнянням «вхід – вихід», заданим у неявному вигляді [3, с. 12]

$$\varphi(y^{(n)}, y^{(n-1)}, \dots, y, u^{(m)}, u^{(m-1)}, \dots, u) = 0, \quad (1)$$

де $y = y(t)$ та $u = u(t)$ – вихід і вхід АД відповідно; m і n – максимальні порядки похідних $u^{(i)}$, $y^{(i)}$ вхідної та вихідної змінних.

Потрібно побудувати такий регулятор (у класі нейромережеских структур), який забезпечував

би управління об'єктом (1) за дотримання таких вимог до синтезованої САК:

- астатизм (нульова статична похибка);
- фізична реалізація регулятора;
- стійкість і задана якість процесів керування на множині $M = \{ M_1, \dots, M_R \}$ режимів АД;
- мінімальна складність регулятора.

Структури адаптивних НМ-регуляторів АД. Потрібно побудувати адаптивний регулятор у класі нейромережових структур, який забезпечував би стабілізацію режимів роботи одновимірного об'єкта (1) за дотримання вимог до синтезованої САК АД з можливістю автоматичного (on-line) налаштування параметрів регулятора у разі зміни параметрів (або режимів роботи) об'єкта.

Найбільш очевидний варіант побудови такої системи базується на використанні НМ як пристрою адаптації параметрів лінійного ПІ-регулятора (рис. 1 а) [3, с. 12]. Метою алгоритму навчання тут є формування таких коефіцієнтів посилення K_1 і K_2 регулятора, за яких досягається наближення виходу об'єкта до виходу еталонної моделі (ЕМ): $y(t) \rightarrow y_{EM}(t)$.

Недолік цієї схеми – обмеженість її застосування за високих порядків диференціального рівняння (1), тобто неможливість отримання в цьому разі заданих показників якості шляхом впливу тільки на два параметри системи K_1 і K_2 . Наведена на рис. 1 б схема має більші можливості, оскільки НМ тут виконує не тільки функції обчислення коефіцієнтів підсилення по сигналу похибки e й інтеграла від сигналу похибки x , але і формування інверсної моделі АД. Варто зауважити, що для вирішення останнього завдання необхідно вибирати структуру НМ у класі динамічних нейронних мереж, причому складність цієї структури має співвідноситися зі складністю АД.

Мета навчання НМ – забезпечити близькість (в ідеалі збіг) перехідних процесів $y(t)$ і $y_{EM}(t)$.

Ще один перспективний варіант побудови адаптивної системи показаний на рис. 1 в. На відміну від схем на рис. 1 а і б, еталонна модель системи тут присутня лише в неявному вигляді і задається за допомогою коефіцієнта зворотного зв'язку τ . Справді, зменшуючи похибку навчання НМ до нуля, добиваємося виконання умови:

$$\varepsilon(t) = \tau \cdot y(t) - \int e(t) dt \rightarrow 0. \quad (2)$$

Аналогічна умова виконується і для похідної:

$$\varepsilon(t) = \tau \cdot y(t) - e(t) \rightarrow 0,$$

звідки, враховуючи вираз для сигналу похибки $e(t) = g(t) - y(t)$,

отримуємо остаточно:

$$\tau \cdot y(t) + y(t) = g(t). \quad (3)$$

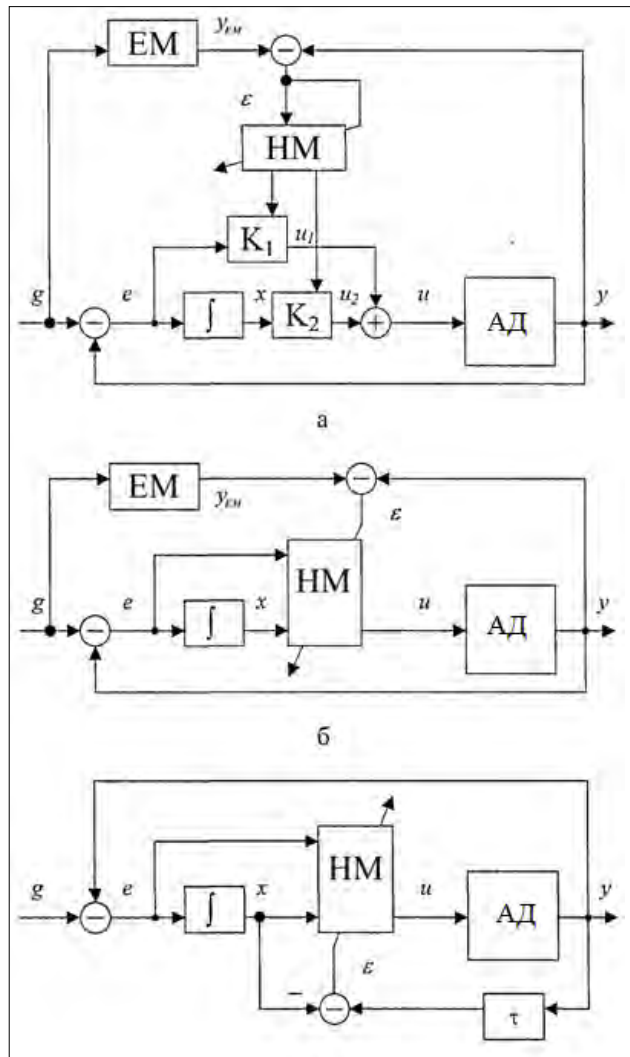


Рис. 1. Варіанти побудови адаптивних нейромережових регуляторів

Таким чином, величина коефіцієнта τ визначає бажаний час регулювання $t_{рег} = (3..4)\tau$ у разі обробки ступінчатого задаючого впливу $\Delta g(t)$.

За мінімізації похибки навчання виду:

$$\varepsilon(t) = \tau_1 \cdot y(t) + \tau_2 \cdot y(t) - \int e(t) dt \rightarrow 0, \quad (4)$$

отримуємо інше співвідношення між виходом і входом системи:

$$\tau_1 \cdot y(t) + \tau_2 \cdot y(t) + y(t) = g(t) \quad (5)$$

що відповідає еталонній моделі другого порядку.

Розробка структури НМ-регулятора АД. Після вибору схеми побудови адаптивної САК ГТД проводиться синтез структури НМ-регулятора [6, с. 56]. Деякі результати вирішення завдання структурного синтезу НМ-регулятора для АД, описуваною функцією передачі загального вигляду $W_0(z)$, що має порядок чисельника m і порядок знаменника n , наведені в табл. 1.

Зауважимо, що 1-й рядок табл. 1 ($p = q = 0$) відповідає двоходовому ПП-регулятору, який може бути реалізований або в лінійному варіанті з нейромережевим налаштуванням (рис. 1 а), або шляхом прямого увімкнення НМ у каналі управління (рис. 1 б).

Таблиця 1

Варіанти структур адаптивного нейромережевого регулятора

n	m ₁	σ	p	q	(КП)
1	0	1	0	0	2
2	0	2	1	1	4
2	1	1	1	1	4
3	1	2	2	2	6
3	2	1	2	2	6

Навчання параметрів НМ-регулятора.

Переходимо до етапу on-line-навчання параметрів НМ-регулятора, будемо вважати, що цьому навчанню передують процедура ініціалізації, тобто отримання попередніх значень ваг НМ. Це можна зробити шляхом такого навчання НМ, коли на її входи подаються значення [3, с.13]:

$$x[k] = u[k-1] = \dots = u[k-q] = u_0;$$

$$e[k] = e[k-1] = \dots = e[k-q] = \Delta g_0,$$

де u_0 – значення входу об’єкта на базовому (сталому) режимі; $\Delta g_0 = g - g_0$ приріст сигналу уставки; а як бажана реакція НМ також приймається величина u_0 .

Власне, процедура on-line-навчання полягає в такій настройці ваг НМ, яка мінімізує похибку навчання нейрорегулятора. Можливі варіанти завдання інтегральної похибки навчання E (для будь-якої зі схем на рис. 1 а–в):

$$E_1[k] = \sum_{l=0}^L \varepsilon^2[k-l], \quad (k = L, K+1, \dots), \quad (6)$$

$$E_2[k] = \sum_{l=0}^L \varepsilon[k-l], \quad (k = K_0, K_0+1, \dots), \quad (7)$$

$$E_3[k] = \max_{0 \leq l \leq L} |\varepsilon[k-l]|, \quad (k = K_0, K_0+1, \dots), \quad (8)$$

де під $\Delta t = K_0 - T_0$ розмір «часового вікна», в межах якого оцінюється близькість перехідних процесів $y[k]$ і $y_{EM}[k]$, викликаних зміною сигналу уставки $\Delta g_0 = g - g_0$ ($k = 1, 2, \dots$); T_0 – період дискретизації. Як показують дослідження, рекомендована величина часового вікна Δt може становити:

$$(5 \dots 10) T_0 \leq \Delta t \leq \frac{t_{per}}{(10 \dots 20)}. \quad (9)$$

Налаштування ваг НМ здійснюється на кожному такті роботи нейрорегулятора, починаючи з моменту $K = K_0$, і закінчується досягненням сигналу похибки $e[k]$ деякої заздалегідь заданої величини едод (порогу точності):

$$W_x, W_{Ei}, W_{Ui} = \begin{cases} \text{var, при } |\varepsilon[k]| > \varepsilon_{дод}; \\ \text{const, при } |\varepsilon[k]| \leq \varepsilon_{дод}. \end{cases} \quad (10)$$

Введення зазначеної «мертвої зони» забезпечує робастність алгоритму навчання, оскільки відсутність такої умови може призвести до погіршення результатів навчання для малих значень $\mu[k]$, тобто на етапі завершення перехідних процесів, коли $\mu[k] \rightarrow 0$.

Як показали експерименти, як алгоритм налаштування ваг НМ у процесі on-line-навчання можна використовувати метод градієнтного спуску з моментом. У разі якщо об’єкт керування – АД є багатовимірним (тобто має n входів і m виходів), схема включення НМ у систему керування аналогічна, з лише тією різницею, що замість скалярних змінних $g, e, x, u, y, \varepsilon$ розглядаються відповідні вектори, кожен з яких має N компонент.

Процедура on-line-навчання для багатовимірного випадку є узагальненням одновимірного випадку. Інтегральна квадратична підраховується як:

$$E_1[k] = \sum_{i=1}^N \sum_{l=0}^L \varepsilon^2[k-l], \quad (k = L, K+1, \dots), \quad (11)$$

або із використанням багатовимірних аналогів формул (7 і 8). Розмір «часового вікна» $\Delta t = K_0 - T_0$ тут визначається аналогічно (11).

З метою більш наочного представлення отриманих результатів розглянемо такий приклад.

Синтез НМ-регулятора двовального АД. Об’єктом керування є двовальний АД, вектор входів (керуючих впливів) для якого набуває вигляду $U = (C_p, F_c)^T$, а вектор стану і вектор виходів (керуваних змінних) АД записуються відповідно як $X = (n_1, n_2)^T$ і $Y = (n_1, T_4^*)^T$. Для опису зміни режимів роботи АД скористаємося нелінійною динамічною моделлю двигуна, наведеною в [1, с. 18].

Будемо вважати, що структурна схема адаптивної САК АД відповідає рис. 2, де $g = (\bar{n}_1^0, (\bar{T}_4^*)^0)^T$ – вектор уставок (задаючих впливів) САК.

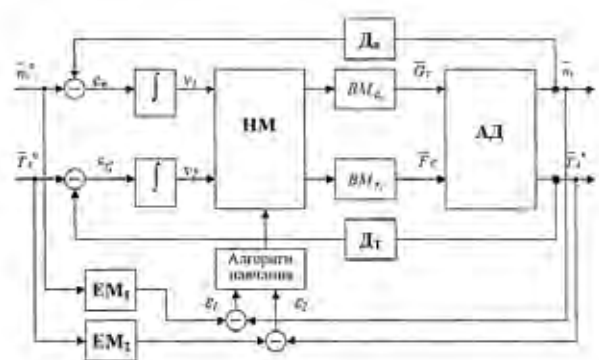


Рис. 2. Структурна схема адаптивної САК двовального АД

Прийемо як базові режими статичні режими роботи ГТД, наведені в табл. 2.

Режими роботи двовального авіаційного двигуна

Режим роботи	$n_1^{(1)}$	$n_2^{(1)}$	$T_T^{*(1)}$	$G_T^{(1)}$	$F_T^{(1)}$
M_1 (номінальний режим)	0.71	1.20	0.09	0.1	0.19
M_2 (максимальний режим)	1.11	1.53	0.24	0.42	0.21

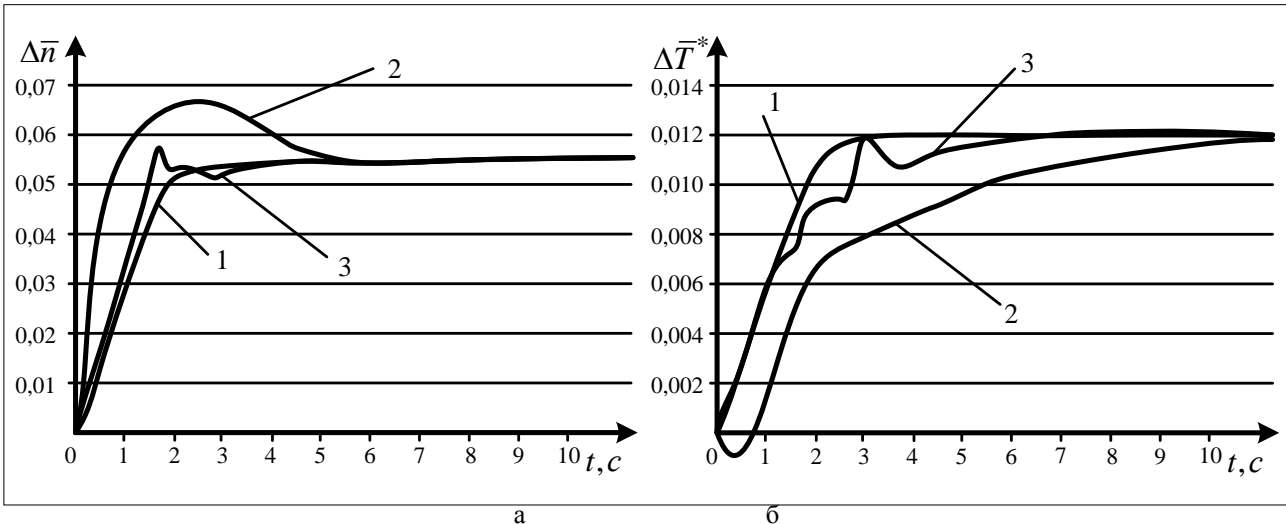


Рис. 4. Результати моделювання адаптивної САК двовального ГТД: 1 – бажані перехідні процеси (з виходу ЕМ); 2 – перехідні процеси після попереднього навчання (ініціалізації) параметрів НМ; 3 – перехідні процеси для режиму on-line-навчання НМ (де $\Delta t=1c, T_0=0,1c$)

Враховуючи, що в цьому разі:

$$N = 2, n = 2, m_{11} = m_{12} = m_{22} = 1, m_{21} = 2, \sigma_1 = \sigma_2 = 1,$$

доходимо до необхідності вирішення такої оптимізаційної задачі: знайти p_i, q_i , що задовольняють обмеження:

$$2 \cdot \sum_{i=1}^2 p_i + 3 \cdot \sum_{j=1}^2 q_j - \sum_{i=1}^2 \max\{p_i; q_1 + q_2\} \geq -4$$

і складають мінімум функції (кількість невідомих параметрів):

$$(КП) = 2 \cdot \sum_{i=1}^2 p_i + 3 \cdot \sum_{j=1}^2 q_j + 8.$$

Вважаючи $p_i \geq 0, q_i \geq 0$ знаходимо шукане рішення, яке в цьому разі є тривіальним: $p_1 = p_2 = q_1 = q_2 = 0$. Неважко переконатися, що за $(КП) = 8$, кількість рівнянь $(КР) = 4$, тобто отримана повнозв'язна структура НМ є надмірною і містить $8-4 = 4$ «зайві» параметри, які без збитку для досягнення заданої якості можна виключити з розгляду. Один з варіантів подібної спрощеної структури нейрорегулятора, що має $(КП) = 4$, наведено на рис. 3.

Оскільки порядок характеристичного рівняння системи при цьому, як і раніше, дорівнює $L = 4$, це означає, що всі коефіцієнти цього рівняння (а значить, і все полюси дискретної передавальної функції системи) залишаються «керованими»,

що забезпечує коректність постановки завдання налаштування ваг НМ.

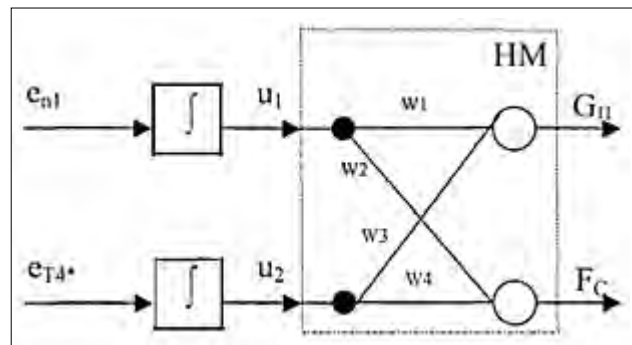


Рис. 3. Адаптивний неймережевий регулятор АД

Ініціалізацію НМ будемо проводити таким чином, щоб отримати одиничні значення коефіцієнтів передачі за каналами:

$$(v_1)0 \rightarrow (u_1)0; (v_2)0 \rightarrow (u_2)0;$$

Як значення v_1 і u_1 використовуємо величину витрат палива $\bar{G}_{П}$ для 2-го режиму (табл. 2), як v_2 і u_2 – величину \bar{F}_C для режиму M_2 . Чисельні значення ваг (параметрів НМ-регулятора) після ініціалізації НМ зведені в табл. 3. Використовуючи алгоритм on-line-навчання, навчимо параметри цього НМ-регулятора, наприклад, на максимальному режимі. Перехідні процеси в досліджуваній

САК АД (після ініціалізації і в процесі on-line-навчання) показані на рис. 4 а і б.

Таблиця 3

Значення параметрів НМ-регулятора після ініціалізації

№ синаптичного зв'язку	W1	W2	W3	W4
Значення	-0,023	0,34	1,46	0,62

Як видно по перехідних процесах, синтезований адаптивний НМ-регулятор відповідає поставленим вимогам. On-line-навчання також можна застосовувати для попереднього навчання синтезованих багаторежимних регуляторів.

Висновки. Проведено аналіз можливих схем включення НМ у САК, у результаті якого виявлено переваги та недоліки основних способів побудови систем управління ГТД з нейромережевими регуляторами.

Розроблено алгоритм структурного синтезу багаторежимного НМ-регулятора ГТД на основі принципу мінімальної складності з урахуванням вимог до астатизму, фізичної можливості бути реалізованим, стійкості і якості перехідних процесів у замкнутій САК ГТД. Запропоновано узагальнення алгоритму структурного синтезу багаторежимних НМ-регуляторів на випадок багатовимірної системи управління ГТД. Показано, що застосування цього алгоритму дає змогу обґрунтовано вибрати клас одновимірних і багатовимірних структур НМ-регуляторів мінімальної складності (включаючи число шарів НМ, кількість нейронів і зв'язків між ними), адекватних розв'язуваній задачі і функціонуючих спільно з лінійними регуляторами ГТД.

Авторами розроблено алгоритм ініціалізації (попереднього навчання) НМ на основі аналізу лінеаризованої моделі першого наближення НМ-регулятора, застосування якого дає змогу гарантувати збіжність процесу навчання параметрів НМ і зменшити похибку навчання порівняно з процедурою випадкового вибору початкових параметрів НМ більш ніж у 2 рази. Проведено дослідження ефективності застосування різних алгоритмів навчання НМ-регуляторів, яке показало перевагу застосування методу симплексного пошуку.

Розроблено алгоритм on-line-навчання параметрів нейромережових регуляторів ГТД на основі вибору й оптимізації функціоналу якості управління, що обчислюється в межах ковзного «часового вікна» розміром 5...10 часових відліків видачі рішень. Показана працездатність цього алгоритму, сформульовані рекомендації щодо вибору параметрів алгоритмів навчання одновимірних і багатовимірних регуляторів ГТД.

Проведено порівняння синтезованих багаторежимних регуляторів на базі традиційного ПІ-алгоритму управління і в рамках нейромережевого підходу. Результати показують, що застосування нейромережових регуляторів дає змогу значно зменшити час регулювання (більш ніж у 2 рази) за рахунок природної нелінійності характеристик НМ-регуляторів на заданій множині режимів роботи ГТД.

Результати синтезу і моделювання САК з багаторежимними НМ-регуляторами ГТД показали ефективність застосування НМ у задачах управління авіаційними двигунами, тому що синтезовані нелінійні регулятори на основі НМ мають простоту, легко навчаються і забезпечують необхідні показники якості на заданій кількості поставлених режимів роботи ГТД.

Список літератури:

1. Єнчев С.В., Таку С.О. Інтелектуальна система автоматичного керування авіаційними ГТД з використанням нейронних мереж. Наука і молодь. 2012. № 11–12. С. 16–19.
2. Панін В.В., Єнчев С.В., Таку С.О. Формування структури інтелектуальної системи автоматичного керування авіаційним ГТД. Авиационно-космическая техника и технология. 2013. № 7(104). С. 181–185.
3. Єнчев С.В., Гашко А.М. Синтез адаптивного нейромережевого регулятора авіаційного газотурбінного двигуна. Наукоємні технології. 2013. № 4(16). С. 10–13.
4. Єнчев С.В., Таку С.О. Формування нейромережевої моделі гвинтовентилятора двигуна Д-27. Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування: матеріали ІV Всеукр. наук.-практ. конф. СЕУТТОО-2013 (Херсон, 9–11 жовтня 2013 р.). Херсон: Вид-во Херсонської держ. морськ. академії, 2013. С. 39–41.
5. Панін В.В., Єнчев С.В., Таку С.О. Формування нейромережевої моделі гідромеханічної системи автоматичного керування авіаційними двигунами. Авиационно-космическая техника и технология. 2014. № 9(116). С. 86–90.
6. Єнчев С.В., Таку С.О. Синтез нейромережевого регулятора авіаційного двигуна. Інтелектуальні системи прийняття рішень і проблеми обчислювального інтелекту: матеріали Міжн. наук. конф. ISDMCI-2018 (Херсон, 21–27 травня 2018 р.). Херсон: ХНТУ, 2018. С. 55–57.

РАЗРАБОТКА АДАПТИВНОГО НЕЙРОСЕТЕВОГО РЕГУЛЯТОРА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Проведен анализ возможных схем включения нейронных сетей в системах автоматического управления авиационных двигателей, в результате которого выявлены преимущества и недостатки основных способов построения систем управления двигателями с нейросетевыми регуляторами. Разработан алгоритм структурного синтеза многорежимного нейросетевого регулятора ГТД на основе принципа минимальной сложности. Предложено обобщение алгоритма структурного синтеза многорежимных нейросетевых регуляторов в случае многомерной системы управления ГТД. Показано, что применение данного алгоритма позволяет обоснованно выбрать класс одномерных и многомерных структур нейросетевых регуляторов минимальной сложности.

Ключевые слова: авиационный двигатель, интеллектуальная система автоматического управления, нейронная сеть, регулятор, обучение.

DEVELOPMENT OF THE ADAPTIVE NEURAL NETWORK REGULATOR OF THE INTELLIGENT CONTROL SYSTEM AVIATION ENGINE

The analysis of possible schemes of inclusion of neural networks in the systems of automatic control of aviation engines is carried out. As a result, the advantages and disadvantages of the main methods of constructing engine control systems with neural network regulators have been identified. The algorithm of structural synthesis of a multi-mode neural network regulator GTE is developed on the basis of the principle of minimal complexity. The generalization of the algorithm of structural synthesis of multi-mode neural network regulators in the case of a multidimensional control system of the GTE is proposed. It is shown that the application of this algorithm allows to reasonably choose a class of one-dimensional and multidimensional structures of neural network regulators of minimal complexity.

Key words: aviation engine, intelligent automatic control system, neural network, regulator, training.

UDC 621.43.031.3(045)

Olali N.V.

Niger Delta University

Olali M.O.

Niger Delta University

Orukari M.

Niger Delta University

Jumbo E.E.

Niger Delta University

A MODEL OF COMPRESSOR BLADES CONTAMINATION IN AVIATION GTE IN OPERATION

An important scientific problem, namely the development of a mathematical model of airborne gas turbine engine blades contamination in operation is solved in the paper. The mechanism of adhesion of dust particles to the blades of GTE is revealed, depending on their size and speed. The structural analysis of dust samples taken at different airfields, as well as deposits on the blades of motor compressors, has been carried out. As the angle of inclination of the surface decreases with respect to the axis of the flow, the marginal size of the area saturated with adhered particles decreases. As a result of consideration of the processes of mass transfer, adhesion and separation, it was concluded that the process of bladder contamination depends on many factors, and the maximum thickness of the layer of deposits is almost equal to the thickness of the boundary layer.

Key words: aviation gas turbine engine, model, blade, pollution, adhesion, nature of the flow.

Introduction. One of the defining conditions in solving the problem of maintaining gas-dynamic stability of compressors GTE in the conditions of operation is to maintain the technical state of the flow section of the engines at a given level with an increase in production.

Experience has shown that from all operational factors that pour into the state of the compressor flow section of GTE, only the effect of pollution can be with a greater or lesser effect eliminated due to the running of the washing of the flow section in operation.

Analysis of recent research and publications. In the practice of the leading airlines, the washing of the flow section of GTE has been widespread since the 70s of the XX century [3; 4]. The study of various methods for washing the flow section [5–7] shows that the most important issues are the justification of the frequency of washing and the effectiveness of detergents, the development of methods for introducing detergents into the flow section, reducing the complexity and time consuming for washing. Solving these issues requires a thorough analysis of the causes of pollution and their chemical composition.

Construction of a model of blades contamination.

The condition of contamination of bodies in a polluted air stream is the excess of the forces of adhesion of particles of contamination to their surface over the

separation forces. Adhesion of particles in the general case occurs under the influence of molecular, electric, Coulomb, capillary forces and frictional forces. Its size is influenced by the size, shape, chemical composition of particles, geometric and aerodynamic characteristics of the elements of the flow section, the material from which they are made, the state of their surface. The determinants in this case are the conditions for the particle's approach to the surface and the time of contact with it. Fastening of particles will depend on the peculiarities of the motion of particles near the surface, conditions that promote or prevent the contact of particles with the surface and adhesion to it, the physical and chemical parameters of the material of the surface and particles, the structure of the boundary layer, the interaction of particles settled in the dusty air stream and a number of others factors [3, p. 86]. At adhesion, the velocity of the particles at which adhesion occurs is of high importance. With regard to the compressor blades of GTE, these speeds can be determined by gas-dynamic calculation. Performed studies on the adhesion of particles from the air flow with a change in a wide range of values of the relative velocity of particles showed that the curves of the adhesion of particles to substrates from different materials have two transition points, in which the patterns of the number of particles adhering to the

flow velocity change. The velocities corresponding to these points can be conventionally called the first and second critical velocities (Fig. 1).

The main factors affecting the content of particles are the size and velocity of the particles, as well as the elastic properties of the materials of the contacting bodies and the number of particles adhering from the material of the surface.

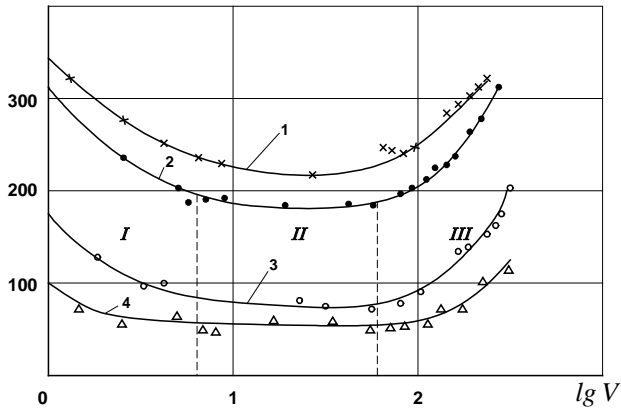


Fig. 1. Dependence of the number of particles that settled on the surface of the samples, on the velocity of particles (in m / s): 1 – duralumin; 2 – duralumin with an enamel coating; 3 – heat resistant laminate; 4 – steel

The smaller the number of the particles, which are fixed to the surface, the greater the value of the second critical velocity. The values of the first and second critical velocities depend on the material of the surface.

The condition for fixing particles can be represented as:

$$F_i + F_{sa} + F_f + P > F_{er} + F_{ff},$$

where F_i – force of inertia; F_{sa} – the strength of adhesion; F_f – friction force; P – force of gravity of a particle; F_{er} – the force of elastic repulsion; F_{ff} – frontal force.

The most intense contamination of the flow section occurs when the rotor runs out after stopping, the parking of aircrafts without covers and gas stubs in the conditions of a dusty atmosphere.

When considering the adhesion and rebound of particles, it is necessary to take into account the conditions of contact of particles with the surface when it is blown by dusty air flow. The F_{er} value is directly proportional to the square of the radius of the particles r_2^2 , and the adhesion strength is proportional to r_2^{-1} [4, p. 212]. Then, the ratio of F_{sa} to F_{er} is proportional to r_2^{-3} and depends on the conditions of the flow of obstacles, and on the elastic properties of the surface. Under the same conditions of flow, the number of particles that settled N is proportional to the ratio of F_i/F_{er} . Since this ratio is strongly increased with a decrease in the radius of the particles, then,

with decreasing r_2 , the magnitude of N will increase as well. According to the observations [4, p. 214] particles up to $1\mu\text{m}$ stick irrespectively the flow velocity.

The main value that characterizes the fixation of particles on the surface at a high speed of their flight, characteristic of the operating modes of GTE, which is hundreds of meters per second, is the depth of penetration. Depending on the ratio of the diameter of the particles and the depth of penetration, there can be two cases: the penetration depth H is less than or equal to the radius of the particles $H \leq r_2$ and $H > r_2$. The depth of particle penetration is proportional to the particle's velocity, their size and density and inversely proportional to the mechanical strength of the surface.

Operational contamination of the aviation GTE blades.

The correctness of the above considerations is confirmed by the research. Structural analysis of dust samples taken at different airfields, as well as deposits on the blades of compressors of engines NK-8-2U, D-30 II and III series, D-36 showed that particles of dust up to 10 microns make up 8...11% of the volume, and the composition of deposits on the blades of compressors are the particles, which are not larger than 3...5 microns. It should also be noted that the number of pollutants on the titanium blades is greater than that of steel ones [3, p. 88; 5, p. 34].

The electrical component of the adhesive force for non-discharged particles can be determined from the expression:

$$F_e = 2\pi q^2 S,$$

where S is the contact area; q is the specific charge of the layers of the double electric layer created on this contact area.

Experimental data [4, p. 312] show that because of this, total adhesion will mainly have an electrical nature and grow in proportion to the square of the radius. For particles of dielectrics (in the vast majority of cases pollution particles are dielectrics by their nature) contact with metal is accompanied by the creation of a double dielectric layer. In this case, in a medium that does not conduct a current (such kind of medium is usually gases), with any contact violations there is a non-equilibrium electrical component of adhesion, which can exceed a few times the equilibrium (electrostatic) component as it is inversely proportional to the square of the diameter of the particles d_2 :

$$F_{neq} = q_0^2/d_2^2.$$

The full force of adhesion and the force to be overcome when the particles are separated from the surface, corresponding to the zero distance between them equals to

$$F_{ad} = -\frac{2\pi r_1 r_2}{r_1 + r_2} [\sigma_{12} - \sigma_{13} - \sigma_{23}].$$

On the other hand,

$$F_{ad} = F_{mol} + F_{eq} = F_{mol} + F_e + F_{neq} = F_{vdw} + F + F_e + F_{neq},$$

where F_{vdw} – van der Waals forces; F_{mol} – capillary forces that have a molecular nature; F_e is equilibrium and F_{neq} is the no equilibrium electrical component associated with the appearance of a double layer and the preliminary electrification of particles in the gas stream.

Assessment of particles adhesion to obstacles in the air flow. But before moving on to the study of the process of removing adherent particles from the upper surface separation, consider some of the quantitative relationships that allow us to estimate the adhesion of the particles to the obstacles in the air flow. It is necessary to take into account two circumstances:

- previously adherent particles;
- the fact that dusting occurs on all sections of the profile and on the height of the blades.

The adherent particle shields for other particles a part of the area that can be determined by the formula:

$$a = \pi d_2^2 / 2 \sin \phi,$$

where ϕ is the angle of the flow and the surface encounter.

The area of the blade, which is occupied by adherent particles, equals:

$$S_p = \left(\frac{\pi d_2^2}{2S \sin \beta} - \sqrt{\frac{\pi d_2^2}{2S \sin \beta} - \frac{\pi d_2^4}{2S^2 \sin \phi}} \right) \pi d_2^2 N_p 100 / 4S,$$

where N_p is the number of adherent particles; S – surface area of the blade blown by the flow; β is the angle of the installation of blades in a grate.

With the decrease of the angle of inclination of the surface in relation to the axis of flow, the limiting size of the area saturated with adherent particles decreases. As the flow velocity increases, the previously described change of adhesion is observed due to their separation or penetration.

The nature of the deposition of contaminants is influenced by the state of the boundary layer, therefore it is necessary to link the process of mass transfer of pollution to the surface of the elements of the flow section with the phenomena occurring in the boundary layer. In accordance with the flow conditions for the laminar boundary layer, the resistance strength can be determined from the equation [4, p. 316].

$$F = 3\pi\mu V_2 d_2$$

and for the turbulent boundary layer [4, p. 318] of the equation:

$$F = \frac{19,8\rho^2 V_\infty^{1,44} d_2^{1,44} v^{0,54}}{x^{0,14}},$$

where $V_2 = \frac{V_\infty d_2}{28}$ is the velocity in the laminar layer at the height of the radius of the particles; V_∞ is the speed at the boundary of the laminar boundary layer, which equals to

the free flow velocity; μ is dynamic viscosity; d_2 is a diameter of the particle; δ is thickness of the boundary layer; ρ is air density; ρ^2 is density of particles; ν is kinematic viscosity; x is a distance from the leading-edge profile.

The force of dynamic action is manifested by the impact of particles moving on adherent ones. As a result of adding this force to the aerodynamic the separation force increases. The larger the number of particles, the less the flow velocity required for the particles separation.

When the impact of particles reaches the adjuvant, the amount of motion equals to the pulse of force $F_d = F_1 + F_t$, which is spent not only on the deformation of the contact zone (under the action of force F_1), but also on the separation of the adherent particle (under the action of F_t)

$$m_2 (V_1 - V_2) = F_d \Delta t, \quad (1)$$

where m_2 is the mass of the particle; V_1 is particle velocity before impact; V_2 is a speed of rebound; Δt is time of impact.

For force F_t equality $F_t = F_d \sin \beta$, where β is the angle of particle contact with the surface.

Before separation, the particle can slide on the surface, with the condition of slipping $F_{sep} \geq \mu F_{ad}$, where $F_{sep} = F_d \cos \beta$, μ is a coefficient of friction; F_{ad} is the adhesion force (μ and F_{ad} can only be determined experimentally).

From [4, p. 320] the time of impact of particles in contact with the surface equals:

$$\Delta t = 6,11 \cdot 10^{-4} / V^{0,2}.$$

Then the equation of motion (1) will look like:

$$m_2 V^{0,2} (V_1 - V_2) = 6,11 \cdot 10^{-4} (F_d \sin \beta + \mu F_{ad} / \cos \beta) k,$$

where k – coefficient, which takes into account energy losses in the contact zone deformation.

From equation (2) we can determine the force of dynamic action. The more particles carry the airflow and the larger their size, the stronger its effect on the adherent particles. In the case when the size of the grains flowing into the flow section of the working engine is 1 ... 2 orders of magnitude higher than the size of previously adherent particles, then the force F_t for a stream of this concentration is found to be higher by 1 ... 2 orders of magnitude.

At separation of particles two phenomena are distinguished, they are: erosion and denudation. Erosion is an autogenous separation of individual particles or a layer of dust. In this case, the adhesion force is greater than the force of autohesion (the forces of particle clustering with each other).

$$F_{ad} > F_{autoh},$$

where F_{ad} is the force of adhesion; F_{autoh} is the power of autohesion.

Denudation is an adhesive separation of the whole

mass of adherent particles. In this case, the $F_{ad} < F_{ate}$. At denudation, the gap starts from the middle edge and the airborne dust cloud fills the entire blade channel. There is a class of pollution in which denudation of such particles does not occur (compact dust, gypsum, shale, carbonates). The layer of particles of the correct form tears off faster than of the wrong one. At an air flow velocity of about 30 m/s (which corresponds to the cold-scroll mode for fixed shoulder blades), after about 0.25 seconds, about 60% of adherent particles of the correct form and only 20% of irregular particles [4, p. 326] are cut off from the beginning of the air flow interaction. The speed of denudation can be estimated by the formula:

$$V_{denud} = K_1 (F_{autoh} \rho_2)^{0.5} + K_2,$$

where for the adherent layer of particles of the correct form $K_1 = 17,6$; $K_2 = 21,8$; but for the wrong one – $K_1 = 16,6$; $K_2 = 26,6$.

Studies conducted show that the time of denudation can be just a second. The time of erosion is much larger and in some cases is hundreds of seconds. The dependence of the wear of particles of pollution on the velocity of the airflow bears the character of raising to a power. The separation and wearing of dust particles depend on the magnitude and direction of the force applied to the particle. If the separation force is applied normally to the dusty surface, then the separation of the particles requires the condition $F_r > F_{ad}$. When the force is tangentially directed, the moment of forces $M_t = F_{t2}$ operates. The first stage of the separation process in this case will be rolling or sliding of the particle, that is, overcoming not only the forces of adhesion but also friction. Increasing the angle of the air flow and the dusty surface encountering increases the efficiency of dust separation.

When blowing compressed blades on, adherent particles are affected by the forces of adhesion of F_e , the mass of particles P , and the aerodynamic force of F_{aer} . The conditions for separation of particles can be represented by inequality:

$$F_{aer} \geq \mu F_{ad},$$

where μ is the coefficient of friction.

The aerodynamic force is basically the strength of the resistance, which can be determined by the formula:

$$F_{aer} = F_c = C_x \frac{\rho V^2}{2} S_2,$$

where C_x – coefficient of dynamic resistance of particles; ρ is air density; V is flow rate; S_2 is the area of the particle master cross-section.

The flow conditions of the particles in the stream and those, which are adherent to the blades are not identical. The rate in the non-excited flow is distributed more or less evenly. In the boundary layer, the

flow rate varies from zero to a definite value. This change affects the aerodynamic force, since the coefficient C_x depends on the Reynolds number, which, in turn, depends on the flow velocity:

$$C_x = F(Re); Re = F(V).$$

Thus, this parathion of the air flow by adherent particles is in separable linked with the structure of the boundary layer and the distribution of velocity in this layer. The nature of the action of the flow on the adherent particles can be determined from the number of Reynolds $Re = \frac{d_2 V}{\nu}$ taking into account the diameter of the particles [6, p. 341]:

$$\frac{d_2 V_{sep}}{\nu} < 5 \text{ laminar action;}$$

$$5 < \frac{d_2 V_{sep}}{\nu} < 70 \text{ laminar-turbulent action;}$$

$$\frac{d_2 V_{sep}}{\nu} > 70 \text{ turbulent action,}$$

where d_2 is the diameter of the particles (the thickness of the deposit layer); V_{sep} is the rate of erosion or denudation (speed at the height of the radius of particles); ν is the kinematic viscosity of air.

The action of the flow on the adherent particles in the conditions of a laminar boundary gas and laminar sublayer has common and distinct patterns. The commonality is that there is a linear change in velocity in the thickness of the laminar layer and laminar sublayer. The difference is that the laminar boundary layer directly contacts an unexplained flow. With a turbulent boundary layer between the laminar sublayer and the non-excited stream there is a buffer layer and a turbulent core. These features affect the aerodynamic force.

When laminar mode is wrapped $C_x = \frac{24}{Re}$. Taking into account the known equations for the master cross-section of the particle $S_2 = \frac{\pi d_2^2}{4}$ and the Reynolds number $Re = \frac{d_2 V_2}{\nu}$, we find the following expression for the aerodynamic force, laying $V_2 = V_\infty \frac{d_2}{2\delta_{LPS}}$ (the linear law of the velocity distribution in the boundary layer):

$$F_{aer} = 3\pi\eta V_\infty d_2^2 / 2\delta_{LPS},$$

where η is dynamic air viscosity; δ_{LPS} is the thickness of the laminar boundary layer.

The thickness of the laminar layer is the line at which the growth of aerodynamic force is observed. Therefore, in order to determine the particle separation conditions and the calculation of the aerodynamic force, it is necessary to know the thickness of the laminar layer, which depends on the speed of the unexcited flow V_∞ and the distance x from the leading edge of the blade to the location of the adherent particles. The dependence of the thickness of the laminar boundary layer on V_∞ and x is expressed by the Blasius formula:

$$\delta = 5,0 \sqrt{\frac{\nu x}{V_\infty}}$$

$$\text{Then } F_{\text{aer.LPS}} = 0,94\rho d_2^2 V_\infty \left(\frac{v}{x}\right)^{0,5}.$$

This formula can be used to determine the aerodynamic force required for the separation of adherent particles under the conditions of the laminar boundary layer. In the turbulent mode of flow around a dusty surface, the thickness of the laminar sublayer at the free flow of the surface can be determined by the formula [6, p. 344]:

$$\delta_{LTPS} = 33,3v/V^{0,857} \left(\frac{v}{y}\right)^{0,333}, \quad (3)$$

where V is the flow velocity in the laminar sublayer at a height Y from the surface. The relationship between V and V_∞ is determined from the ratio $V/V_\infty = (Y/\delta_\tau)^{0,143}$, where δ_τ is the thickness of the turbulent boundary layer at a distance x from the leading edge.

Then we find from formula (3)

$$\delta_{LTPS} = 33,3v/V_\infty^{0,857} \delta_\tau^{0,143}. \quad (4)$$

The thickness of the turbulent boundary layer is [7, p. 128]

$$\delta_\tau = 0,37x \left(V_\infty \frac{x}{v}\right)^{-0,2} = 0,37x^{0,8} \left(\frac{v}{V_\infty}\right)^{0,2}. \quad (5)$$

Substituting (5) into (4), after transformations we obtain a semi-empirical formula for determining the thickness of the laminar sub layer in a turbulent flow mode:

$$\begin{aligned} \delta_{LTPS} &= 3,33 \left(\frac{v}{V_\infty}\right)^{0,857} \left[0,37x^{0,8} \left(\frac{v}{V_\infty}\right)^{0,2}\right]^{0,143} = \\ &= 29,4x^{0,1} \left(\frac{v}{V_\infty}\right)^{0,9} \end{aligned} \quad (6)$$

Where x is the distance from the leading edge; ν is kinematic air viscosity; V_∞ is the free flow rate.

To determine the aerodynamic force, it is first necessary to determine the coefficient C_x . For a turbulent boundary layer, the coefficient of resistance is approximated by the following expression [7, p. 130]:

$$C_x = \frac{22}{Re^{0,7}}.$$

Then the aerodynamic force in the turbulent boundary layer can be determined from the expression [4, p. 331]:

$$F_{\text{aerTPS}} = 2,75\pi\rho\nu^{0,7}d_2^{1,3}V_2^{1,3}; V_2 = V_\infty \left(\frac{d_2}{2\delta_\tau}\right)^{0,143}$$

$$\text{In turn } \delta_\tau = f(x) \text{ and } V_2 = V_\infty \left(\frac{d_2}{0,74x^{0,8}\nu^{0,2}}\right)^{0,143}$$

The final expression for

$$F_{\text{aerTPS}} = 19,8\rho V_\infty^{1,36}d_2^{1,44}\nu^{0,54}/x^{0,14}.$$

The given expressions for calculating the aerodynamic force are not accurate, because they take into account the velocity distributions in the boundary layer.

Determination of the zones and thickness of pollutants on the compressor blades.

As a result of consideration of the processes of mass transfer, adhesion and separation, it can be con-

cluded that the process of bladder contamination is practically impossible to calculate accurately; and it depends on many factors, and the maximum thickness of the bed of deposits is almost equal to the thickness of the boundary layer calculated for a given point of the surface to the distance from the leading edge and number Re for sand roughness or no excited flow.

Then the thickness of the blades of the compressor for normal operation can be expressed in the form of the equation:

$$\begin{aligned} \delta_3 &= \delta_{\text{TPC}} [1 - \exp(-k_p\tau)] \sin\phi \sin\beta \Big|_{\beta_1}^{\beta_2} = \\ &= 0,37x^{0,8} \left(\frac{v}{V_\infty}\right)^{0,2} [1 - \exp(-k_p\tau)] \sin\phi \sin\beta \Big|_{\beta_1}^{\beta_2}. \end{aligned}$$

It follows from the formula that the thickness of the deposits increases along the blade cord in the direction of the flow and depends on the structural angles β_1 and β_2 of the inlet and outlet of the flow, as well as the mode of operation of the engine and the speed of flight. They all determine the angle of the profile ϕ . Therefore, the problem of determining the thickness of the layer of contamination for a free profile (isolated blade) can be reduced to the solution of the equation of the boundary layer. However, the feature of the flowing part of the compressor lies in the fact that the shoulder blades are a system of diffuser channels, which in a greater degree are prone to failure of the flow. The disruption of the flow occurs due to the features of the flow in the diffusers, the aerodynamic characteristics of the compressor profiles, the presence of flow unevenness and a number of other factors. In this process, contamination plays a role of the initiating factor. As a rule, the breakage zone is located behind the throat of the intrapulmonary canal on the back of the profile [7, p. 265].

The breaking area on the compressor blades has a clearly defined boundary, the location of which is a subject of calculation. In the range of numbers Re , in which modern engines operate, there are several characteristic zones on the surface of the blades [3, p. 97] (Fig. 2).

On the back of the shoulder blade is a small length-bearing zone lying near the entrance edge of the blade, with a laminar boundary layer, which ends with a zone of laminar separation. The length of the laminar zone in the range of numbers $Re = 10^4 \dots 10^6$ is $(0,003 \dots 0,16) b$, the zone of laminar separation is $(0,02 \dots 0,05) b$, (where b is the profile chord). To calculate the maximum thickness of deposits in the laminar zone, we can use the Blasius equation, where Re is calculated by the velocity of the unexcited flow for the distance x from the leading-edge profile.

According to the zone of laminar separation, the zone of turbulent flow regime begins, where the thickness of the contaminants is determined by the thickness

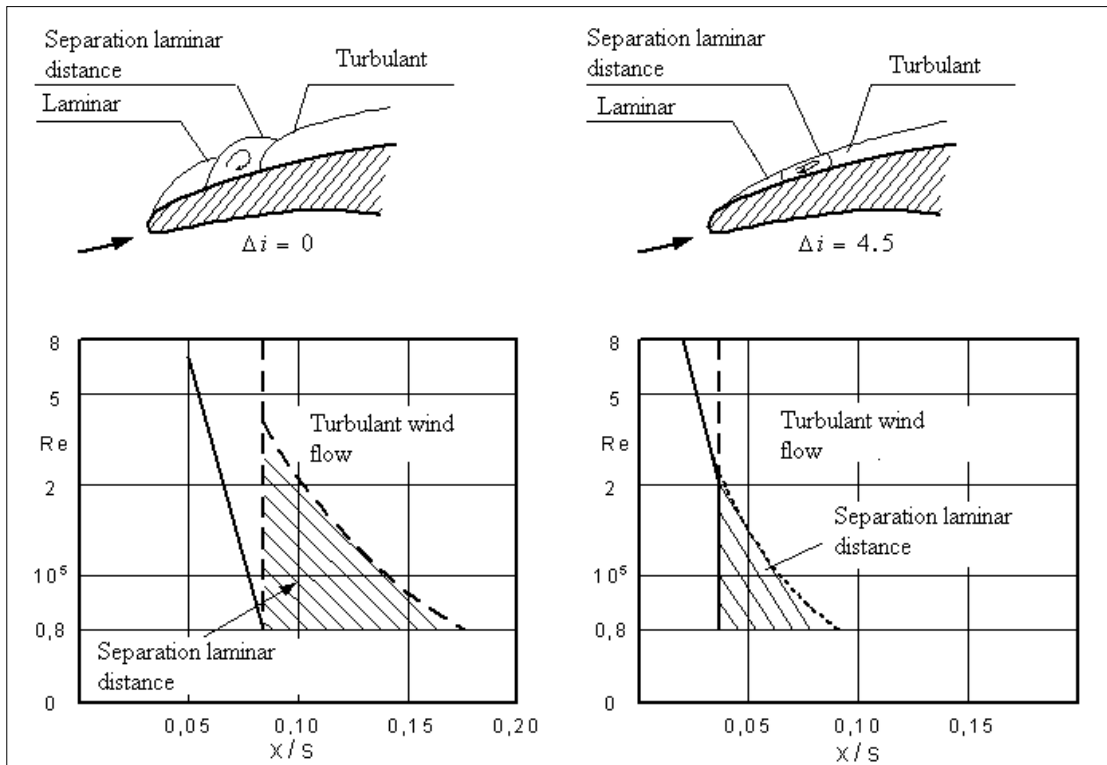


Fig. 2. The influence of the Reynolds number and the angle of attack on the flow regime in the boundary layer

of the laminar sublayer and the thickness of displacement and can be determined by the formula [5, p. 41]:

$$\delta_3 = 29,4x^{0,1} \left(\frac{v}{V_\infty} \right)$$

In the diffuser interblade vane channels, the laminar sublayer at a positive pressure gradient along the length of the channel rapidly loses its stability and is disconnected, therefore, quickly after the turbulent flow regime is established, the gap of the boundary layer passes and a significant part of the surface of the back of the blade operates under breakage conditions. The breaking of the boundary layer significantly changes the conditions of flow. By the point of separation, the boundary layer is characterized by two opposite flows: the outer has the direction of the core of the flow, the inner – the opposite. The boundary layer is twisted into a whirlwind. The appearance and wear of vortices is accompanied by the accumulation of slowed air and the formation of a stagnant zone. Due to the influence of vortices, the velocity of particles in this zone will be greater than the irregular flow, and the pressure is less.

Therefore, vertical resistance arises, which is accompanied by energy consumption and increased separation of the process of precipitation of particulate pollutants. The position of the point of separation of the boundary layer can be calculated by the formula [7, p. 218]:

$$x_{sep} = \frac{\delta^{**} \sqrt[5]{Re x}}{K_1 K_2},$$

where $\delta^{**} = \delta_{TPS} \frac{n}{(n+1)(n+2)}$ is pulse loss thickness; $n = 1.43 \dots 2.5$; $K_1 = 0,36$, $K_2 = 0,147 \dots 0,159$ are the empirical coefficients; x_{sep} is the coordinate of the point of separation.

It is easy to show that the position of the point of separation in the peripheral part of the blades shifts back on the chord profile, so the width of the break-away zone to the periphery decreases [7, p. 220]. In the separation zone, the thickness of the contaminants cannot be clearly calculated, but according to experimental data, it is found that it is equal to the thickness of the sublayer of the turbulent zone and significantly affects the amount of losses. On the concave part of the shoulder blade (trough), the turbulent boundary layer is installed directly behind the incoming edge of the shoulder blade and extends without interruption to the entire length of the shoulder blade. The thickness of the contaminants corresponds to the thickness of the laminar sublayer and the length of the chord may slightly increase (Fig. 3).

The given considerations require some adjustments. According to the data obtained by Trukkenbrodt, Glushvits, Schmidtbauer and Parr [6, p. 154], the structure of the boundary layer on the shafts of movable (impellers) and

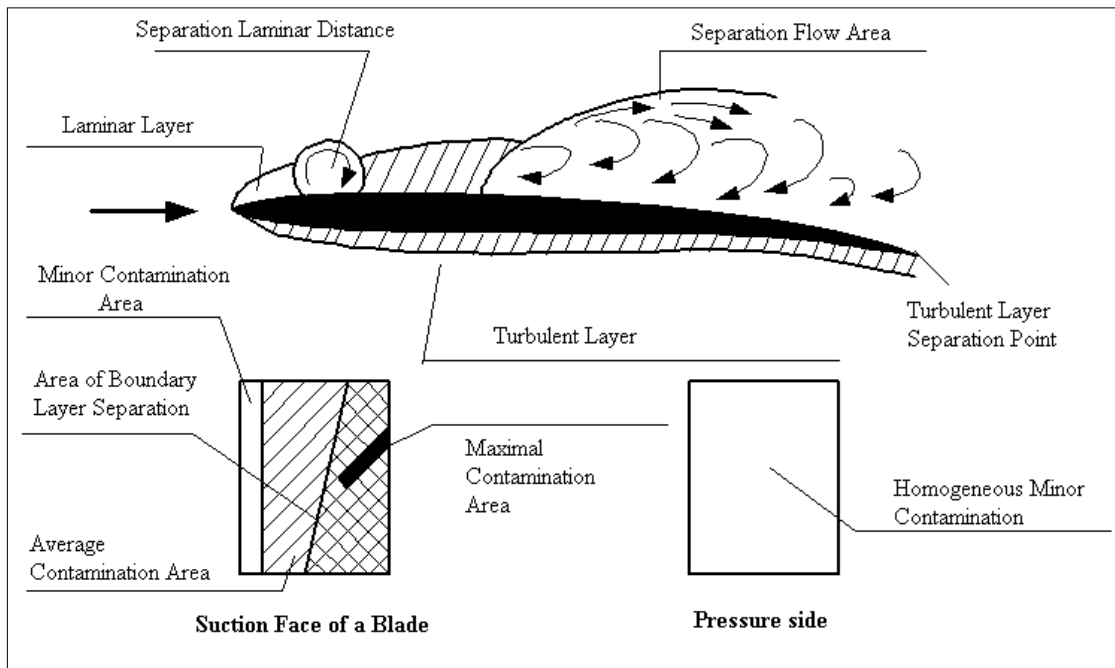


Fig. 3. Distribution of the boundary layer and the nature of pollution of the working blades of the compressor

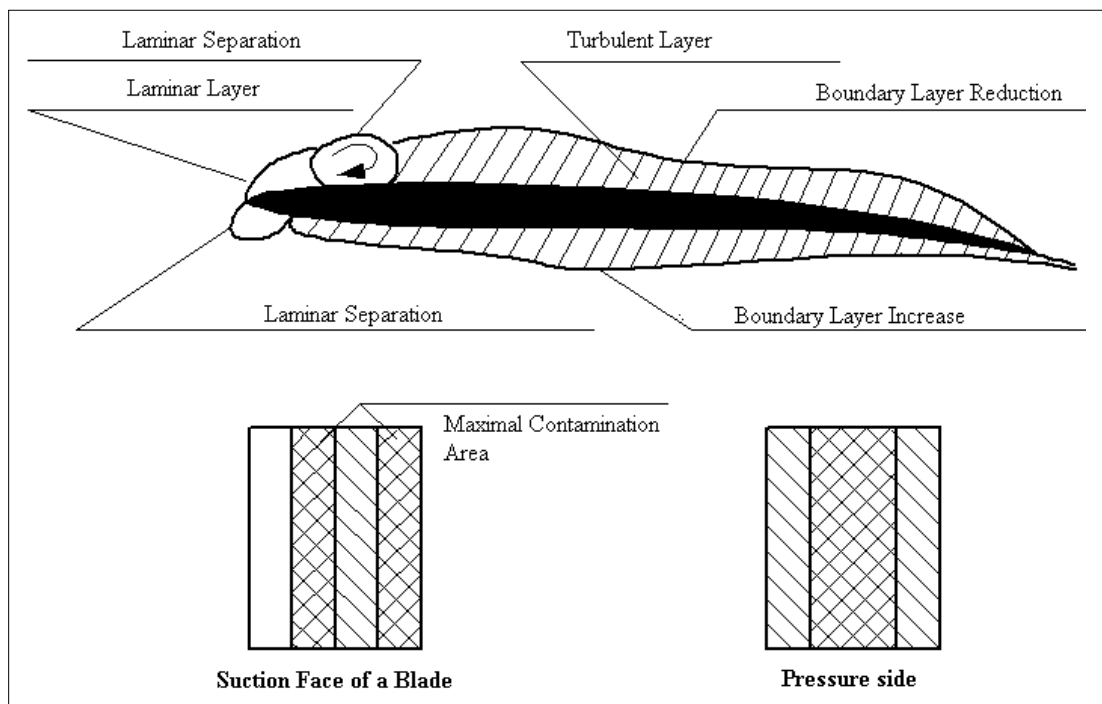


Fig. 4. Distribution of the boundary layer and the nature of the blades contamination of the compressor guiding apparatus

fixed (guiding apparatus) crowns differs, with its thickness for rotating blades strongly increases with increasing parameter $\lambda = \frac{\omega R}{V_\infty}$, where ω is an angular velocity; R is a radius; V_∞ is the axial velocity of the unexcited flow.

On the blades, which rotate, the boundary layer becomes thinner than with the flat flow of the same

profile due to centrifugal forces, which also significantly affect the transition of the laminar form to the turbulent one. This conclusion is experimentally confirmed in [3, p. 99; 5, p. 341], where it is shown that on the blade, which rotates, the transition of the laminar form to the turbulent one, passes under other

different conditions with a significantly smaller number of Re than on the fixed ones.

On the concave part of the stationary blades, the boundary layer is thicker, and the maximum thickness corresponds to the largest curvature of the profile. In this case, this parathion of flow on the back of the profile of the fixed blades of the guides is not observed. Accordingly, the deposition of pollution on the blades of the guides will be different from the deposits on mobile blades (Fig. 4).

Taking into account all of the above, it can be concluded that the thickness of the contamination layer stabilized on the blades of the compressors is equal to the thickness of the boundary layer, and the distribution of them on the profile of the blades corresponds

to the presented picture of the flow. The dynamics of the growth of the thickness of pollution is determined by the value of the coefficient Kr , which is included in the index of power. The calculation of this coefficient is an extremely difficult task and for practical purposes Kr can be determined only experimentally.

Conclusion. The validity of the developed model of distribution of pollutants on the surface of blades is confirmed experimentally. Investigation of the fan blades, compressors of medium and high-pressure engines D-36, which were conducted in conditions of aircraft repair plant, showed that the contamination of the rotter blade, regardless of the work of the engines, received for repairing was in the accordance with the developed methodology.

References:

1. Kulyk N.V. Parametric methods for assessing the technical condition of aircraft GTE. Kyiv: KIIGA, 1993. 139 p.
2. Osik V.M., Panin V.V. Hammud N. Estimation of the influence of changes in the geometrical dimensions of the elements of the GTD in exploitation on its gas-dynamic stability. Bulletin of the Kiev International Civil Aviation University. Kyiv: KMUTA. 1999. № 1. P. 15–20.
3. Volyanska L.G. Methods and means of increasing the gas-dynamic stability of gas turbine engine compressors: monograph / L.G. Volyanska, V.V. Panin, Sung Gaoyun. K.: NAU, 2005. 200 p.
4. Zimon A.D. Adhesion of the liquid and wetting. Moscow: Chemistry, 1974. 416 p.
5. Gorbanovsky V.B., Panin V.V., Chumak O.I. Method of quantitative estimation of contamination of elements of flow part of PS-90A. Kyiv: KIIGA, 1990. 79 p.
6. Petunin A.N. Methods and technique of measuring the parameters of the gas flow. M.: Mechanical Engineering, 1996. 380 p.
7. Tereschenko Yu.M., Mitrachovych M.M. Aviation gas turbine engines. Kyiv: KVIC, 2001. 312 p.

МОДЕЛЬ ЗАБРУДНЕННЯ ЛОПАТЕЙ КОМПРЕСОРИВ Авіаційних ГТД В Експлуатації

У статті розв'язана важлива наукова проблема – розробка математичної моделі забруднення лопатей авіаційних газотурбінних двигунів у експлуатації. Розкрито механізм адгезії частинок пилу до лопатей ГТД залежно від їх розміру та швидкості. Проведено структурний аналіз проб пилу, які взяті на різних аеродромах, а також відкладень на лопатях компресорів двигунів. Зі зменшенням кута нахилу поверхні стосовно осі потоку граничний розмір площі, насиченої частинками, що прилипли, зменшується. У результаті розгляду процесів масопереносу, адгезії та відриву зроблено висновок, що процес забруднення лопатей залежить від багатьох факторів, а максимальна товщина шару відкладень майже дорівнює товщині граничного шару.

Ключові слова: авіаційний газотурбінний двигун, модель, лопаті, забруднення, адгезія, характер течії.

МОДЕЛЬ ЗАГРЯЗНЕННЯ ЛОПАСТЕЙ КОМПРЕССОРОВ Авиационных ГТД В Эксплуатации

В статье решена важная научная проблема – разработана математическая модель загрязнения лопастей авиационных газотурбинных двигателей в эксплуатации. Раскрыт механизм адгезии частиц пыли к лопастям ГТД в зависимости от их размера и скорости. Проведен структурный анализ проб пыли, которые взяты на разных аэродромах, а также отложений на лопастях компрессоров двигателей. С уменьшением угла наклона поверхности по отношению к оси потока предельный размер площади, насыщенной прилипшими частицами, уменьшается. В результате рассмотрения процессов массопереноса, адгезии и отрыва сделан вывод, что процесс загрязнения лопастей зависит от многих факторов, а максимальная толщина слоя отложений почти равняется толщине предельного слоя.

Ключевые слова: авиационный газотурбинный двигатель, модель, лопасть, загрязнение, адгезия, характер течения.

УДК 621.317.7

Щербань А.П.

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

Ларін В.Ю.

Національний авіаційний університет України

Маслов В.П.

Інститут фізики напівпровідників імені В.Є. Лашкарьова
Національної академії наук України

Качур Н.В.

Інститут фізики напівпровідників імені В.Є. Лашкарьова
Національної академії наук України

СПОСІБ КОНТРОЛЮ ЛІТІЙ ПОЛІМЕРНОЇ АКУМУЛЯТОРНОЇ БАТАРЕЇ БЕЗПЛОТНОГО ПОВІТРЯНОГО СУДНА

У статті розглянуто основні класи безпілотних літальних апаратів (БПЛА) та можливості їх використання. Визначені основні типи елементів живлення БПЛА. Метою роботи є забезпечення електричного живлення для безаварійного польоту БПЛА. Запропоновано спосіб неруйнівного контролю стану літєвих перезаряджуваних автономних джерел енергії (ПАДЕ) на борту БПЛА за допомогою фіксації його поточної температури. Наведені результати дослідження контролю температури реальної системи з використанням оптико-електронного тепловізора. На основі отриманих даних зроблено висновок, що температурний сигнал може бути використаний як критерій вмикання додаткової батареї або припинення польоту БПЛА.

Ключові слова: перезаряджуване автономне джерело струму, літій-полімерні акумулятори, тепловізор, розрядна характеристика, безпілотне повітряне судно, температурний контроль.

Постановка проблеми. Одним із напрямків розвитку техніки останнім часом стало проектування і виробництво безпілотних літальних апаратів (далі – БПЛА, дронів, безпілотників). Інтенсивний розвиток інформаційних технологій у провідних країнах світу призвів до переосмислення концепцій застосування БПЛА, шляхів подальшого їх розвитку, вдосконалення корисного навантаження і надання їм багатоцільового характеру. БПЛА займають гідне місце у виробничих програмах провідних авіабудівників світу. Це обумовлено тим, що застосування БПС і у різних цивільних сферах і у військовій області економічно ефективно і часто дозволяє виконати завдання краще і швидше, ніж це було б зроблено зі застосуванням традиційної авіації, або інших способів.

Сучасний дрон це, передусім, – робочий інструмент, який допомагає досягти певних цілей. Від цього залежатиме вибір типу БПЛА відповідно до характеристик встановленого на ньому обладнання.

Всі безпілотні літальні апарати можна розділити на два основні класи: літаки і коптери (бага-

тороторні вертольоти). БПЛА, побудовані за літаковою схемою, мають велику дальність польоту, можуть значно довше перебувати у повітрі, мають меншу вартість, і простіші в обслуговуванні. Однак для управління літаковим БПЛА треба мати спеціальну підготовку (якщо це не повністю автоматичний апарат), і для зльоту і посадки – відповідний майданчик. Коптер стартує і сідає вертикально, пілотувати його простіше. Але він має обмежений радіус застосування, що залежить від часу польоту, який, у свою чергу, залежить від ємності батарей [1]. У холодну пору року ємність батарей зменшується, відповідно зменшується польотний час і дальність. Оскільки підйомна сила у коптера створюється тільки внаслідок обертання гвинтів, то вихід з ладу одного з двигунів, регуляторів, іншої електроніки може мати фатальні наслідки для апарату. Літакові БПЛА більш живучі, універсальні, насамперед через більшу дальність і довший час польоту. Водночас, коптери мають більш поширене застосування у самих різноманітних сферах – від агротехнологій до військового призначення.

Основні можливості застосування БПЛА поділяються на задачі транспортування та задачі моніторингу. Але у сучасному світі напевно немає області, де б не можна було ефективно застосувати БПС. Це і аерофотознімання, розвідка промислової риби, геологорозвідка, обліт трубопроводів з метою оперативного виявлення аварій, військова розвідка, коректування вогню артилерії і ракет, наведення на ціль бомбардувальників, виявлення човнів, що терплять лихо, виявлення на початковій стадії лісових пожеж, безцінні БПЛА при затриманні злочинців (зверху видно все) і у звичайній практиці патрульної поліції, для доставлення термінових вантажів або документів. Окрім цього є і нетрадиційні можливості застосування БПС. Наприклад, виведення на орбіту супутників (поки невеликої ваги). Насправді, БПЛА можна використовувати фактично у будь-якій сфері людської діяльності, де треба щось швидко розгледіти, проконтролювати, доставити або знищити. БПЛА вигідно відрізняються від супутників (як правило, вони у сотні і тисячі разів дешевші), а завдання спостереження можуть виконати навіть якісніше (у разі потрапляння у хмарність вони мають можливість знизитися по команді оператора і поспостерігати будь-який об'єкт з більш близької відстані).

Живлення таких апаратів можливе за допомогою різних засобів: використання двигуна внутрішнього згоряння і відповідно палива, використання електричного двигуна, який живиться від акумуляторних батарей, енергії сонця та інших засобів, які знаходяться на етапі розробки [2].

Очевидні переваги у цьому випадку має електричний двигун – це низький рівень шуму, відсутність теплового сліду, що зводить до мінімуму виявлення БПЛА та його знешкодження в умовах воєнного часу, простота обслуговування і легкість управління.

Живлення електродвигунів є найбільш поширеним та виправданим, наразі є використання перезаряджуваних автономних джерел енергії (далі – ПАДЕ) [3]. У цьому випадку є один, але серйозний недолік – низька питома енергоємність акумуляторних батарей, що накладає обмеження на дальність польоту безпілотного судна. Враховуючи це, розробники БПЛА віддають перевагу джерелам живлення на основі літію, а саме літій-полімерним акумуляторним батареям (далі – ЛПАБ), оскільки вони володіють досить високими питомими характеристиками.

Однією з актуальних задач при використанні ПАДЕ на основі літію є завдання вимірювання

/ контролю рівня заряду / розряду цих джерел електроенергії. Для проведення діагностики акумуляторів і акумуляторних батарей сьогодні використовуються такі електричні характеристики як напруга розімкненого ланцюга і під навантаженням, внутрішній опір і реакція на специфічний тестовий сигнал, який дозволяє визначити значення складових повного опору. Ці характеристики отримують різними способами залежно від електрохімічної схеми ПАДЕ і обробка результатів надалі відбувається також індивідуально [4; 5]. Якщо у сучасних обчислювальних пристроях, засобах комунікацій, медичних портативних приладах рішення цього завдання не є проблематичним, то при використанні ПАДЕ (а саме ЛПАБ) як джерела енергії БПЛА треба чітко контролювати ситуацію, адже втрата живлення БПЛА потягне за собою не тільки не виконання поставленої задачі, але й втрату літального апарату. А це тягне за собою не тільки екологічні та економічні втрати, але і втрати важливої інформації в умовах використання БПЛА у воєнний час. Інша сторона цієї проблеми полягає у тому, що при надмірному розряді або постійному недорозряді акумулятор втрачає свої властивості і строк його служби значно скорочується [6].

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Наразі основна маса виробників дронів (безпілотних повітряних суден) практикують так звані «польоти з фіксованим часом» – тобто метод контролю розряду ЛПАБ, який полягає у тому, що оператори та інженери, які обслуговують БПЛА, знаючи заявлений виробником у специфікації час розряду конкретної батареї, планують відповідний час польоту, який без сумніву по тривалості встановлюється меншим ніж час розряду батареї. А з огляду на вплив факторів повітряної обстановки (зустрічний або бічний вітер, опади і т.п.), важкість передбачення впливу яких призводить до підвищеного споживання потужності і таким чином до посиленого розряду батареї БПЛА – час польоту свідомо скорочують ще більше [7]. І всі ці дії виправдані, оскільки розряд батареї нижче допустимого рівня означає зупинку електромотора (або електромоторів) і відповідно втрату тяги, що у кінцевому підсумку може з великою часткою ймовірності привести до втрати літального апарату.

Але проблема виникає у випадках, коли погодні умови можуть різко змінитися – акумулятор у цьому випадку різко втрачає рівень заряду і БПС може не тільки не виконати поставлену задачу, але й зазнати краху. А це тягне за собою не тільки

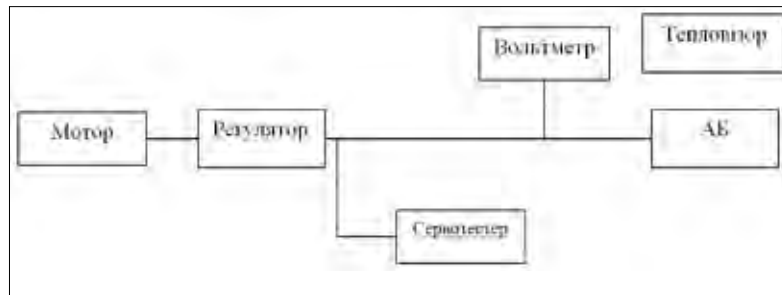


Рис. 1. Структурна схема макетної схеми контролю розряду ЛПАБ при роботі на БПЛА

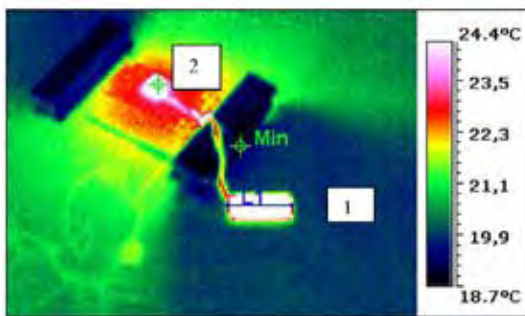


Рис. 2. Результат температурного аналізу досліджуваної макетної схеми за допомогою тепловізора, де 1 – акумуляторна батарея, яка живить двигун 2

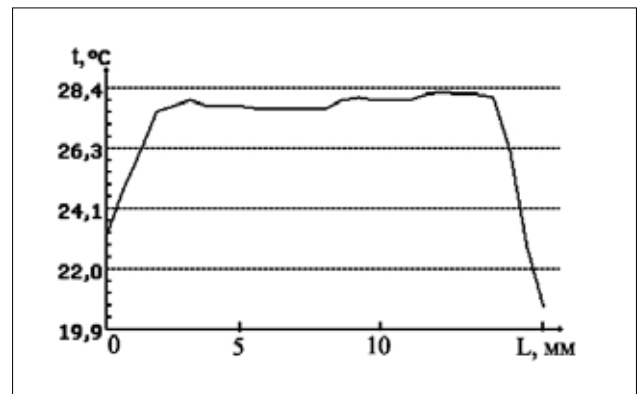


Рис. 3. Графік розподілу температури вздовж лінії L1 (рис. 2) акумулятора

екологічні та економічні втрати, але і втрати важливої інформації в умовах використання БПС у военний час. Інша сторона цієї проблеми полягає у тому, що при надмірному розряді або постійному недорозряді акумулятор втрачає свої властивості і його строк служби значно скорочується.

Другим поширеним способом забезпечення необхідного для виконання польотного завдання обсягу електроенергії є резервування, тобто установка на борт кількох АБ. Використання цього способу дозволяє попередити втрату БПЛА, тому що при розряді однієї батареї автоматично передбачено підключення іншої, потім третьої і т.д. Недоліком цього способу є неминуче зменшення маси корисного навантаження, яка встановлюється на БПЛА, що скорочує його споживчі показники, адже саме використання таких літальних апаратів для вирішення конкретних завдань замовника є економічно обґрунтованим.

Постановка завдання. Зважаючи на все вище зазначене, авторами була запропонована ідея дво-параметричного контролю стану літій-полімерної акумуляторної батареї при її роботі на БПЛА.

Першим контрольним параметром була обрана напруга на виході ЛПАБ. Вона дозволяє оцінити

поточний стан ЛПАБ наступним чином: отримане значення напруги порівнюється з точкою на розрядній характеристиці акумулятора (яка отримується початковими випробуваннями ЛПАБ або з паспортних даних) і відповідно її положення система робить висновок про можливість продовження польотного завдання або необхідність його припинення.

Другим контрольованим параметром була обрана температура самої ЛПАБ. Такий вибір був обґрунтований досить високою чутливістю акумулятора до температурних режимів роботи. Оскільки відомим фактом є те, що акумулятори на основі літію працюють внаслідок окисно-відновних реакцій, що неминуче супроводжуються вивільненням теплової енергії, а також те, що полімери у ЛПАБ реагують на різке зниження температури (що неминуче при польоті БПЛА взимку), то можна стверджувати, що температура самої АБ буде вказувати на час продовження роботи цієї батареї або підключення додаткової батареї живлення для забезпечення безпечного польоту та повернення БПЛА «додому».

Отже, метою роботи є забезпечення електричного живлення для безаварійного польоту БПЛА.

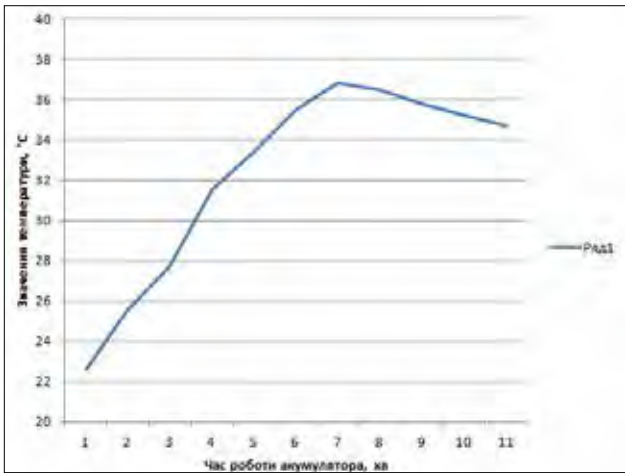


Рис. 4. Графік залежності температури ЛПАБ від тривалості роботи систем

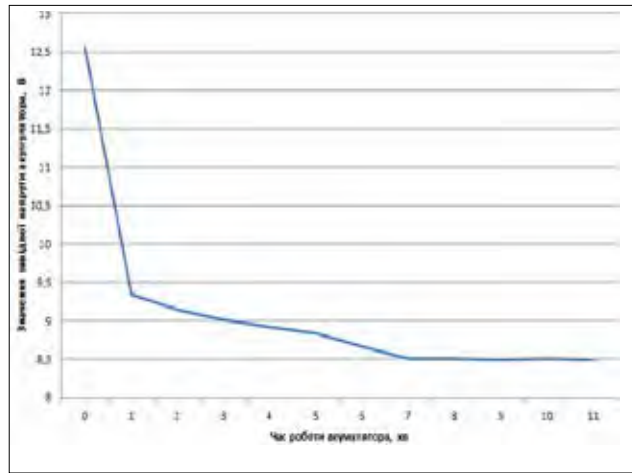


Рис. 5. Графік розрядної характеристики ЛПАБ

Тому задача контролю рівня заряду ЛПАБ на безпilotному судні під час польоту набуває особливої актуальності і потребує вирішення.

Виклад основного матеріалу дослідження. Об'єктом випробувань була літій-полімерна акумуляторна батарея (далі – АБ) фірми zippy compact ємністю 1500mAh.

Для забезпечення необхідного реального навантаження на АБ для коректного дослідження її поведінки під час проведення випробувань у колі макетної схеми (рисунок 1) також використовувалися:

- безколекторний мотор KINGKONG 2204-2300KV;
- регулятор для безколекторних двигунів HobbyKing 12A BlueSeries Speed Controller;
- сервотестер TL2638 CCPM;
- мультитестер для вимірювання напруги UNi-T UT50D (20v±0,01v);
- тепловізор EasIR-4.

Саме тепловізор був обраний як прилад контролю температури тому, що він дозволяє побачити розподіл температури по поверхні досліджуваного об'єкта (рисунок 2, 3), що важливо для попереднього дослідження температурних змін при роботі ЛПАБ.

Дослід відбувався наступним чином: встановленням сервотестера у крайнє положення запускали роботу стенду з максимальним навантаженням на двигун при кімнатній температурі. При цьому кожну хвилину покази вольтметра фіксувалися і значення напруги заносили у таблицю. Одночасно фіксували температуру АБ за допомогою тепловізора. Дослід проводився до повної зупинки двигуна.

За результатами розрахунків були отримані графіки залежності температури (рисунок 4)

ЛПАБ від тривалості роботи схеми та розрядної характеристики ЛПАБ (рисунок 5).

На графіку можна побачити, що АБ спочатку саморозігрівається, а потім при зниженні потужності знижується і її температура.

За графіками видно, що ЛПАБ активно розряджається на протязі 2/3 повного часу розряду, а далі просто підтримує мінімально потрібний рівень напруги. Під час активного розряду відбувається підвищення температури всередині ЛПАБ, що зумовлено особливостями хімічних реакцій, що протікають всередині акумулятора. І саме у момент зниження швидкості розряду температура акумулятора починає падати (у порівнянні з попереднім процесом нагрівання). Тому момент припинення нагрівання акумулятора є контрольною точкою, зважаючи на яку система має приймати рішення про подальше виконання або припинення завдання. При цьому бажане підключення додаткового елемента батареї живлення для безпечного повернення БПЛА «додому». Для реалізації способу можна використовувати напівпровідникові або резистивні температурні сенсори.

Таким чином за запропонованим способом можна провести перше діагностичне випробування нової ЛПАБ перед польотом БПЛА, тим самим установивши індивідуальні характеристики акумулятора, які будуть занесені у пам'ять БПЛА для подальшого прийняття рішення при польоті. Сама ж методика неруйнівного контролю буде полягати у безперервній фіксації напруги живлення та температури акумулятора і порівнянні цих параметрів зі знятими попередньо. І по отриманим точкам на розрядній і температурній характеристиці можна буде прийняти рішення про можливість продовження або припинення завдання БПЛА. При

роботі ЛПАБ в умовах польоту БПЛА температуру акумулятора можна контролювати за допомогою датчика і отримані дані порівнювати з отриманими при першому пробному діагностуванні.

Висновки. Розроблено спосіб температурного контролю ЛПАБ для забезпечення безаварійного польоту БПЛА та його повернення «додому».

Пропонується попередньо проводити при навантаженні, яке імітує інтенсивний політ дрона, контроль нових та періодично батарей, які експлуатуються за параметрами температури та напруги живлення. При досягненні максимальної температури розігрівання батареї потрібно підключати додаткову батарею електроживлення.

Список літератури:

1. Reg Austin. UNMANNED AIRCRAFT SYSTEMS UAVS DESIGN, DEVELOPMENT AND DEPLOYMENT. John Wiley and Sons, 2010. 365 p.
2. John F. Keane, Stephen S. Carr. A Brief History of Early Unmanned Aircraft. Johns Hopkins APL Technical Digest. 2013. Т. 32, № 3.
3. William Wagner. Lightning Bugs and Other Reconnaissance Drones. Armed Forces Journal, 1982.
4. Дрон-почтальон Drone.UA и Новая Почта в галерее инноваций HUB 4.0. URL: <http://drone.ua/delivery-drone/> (дата звернення 15.05.2018)
5. Barton J. D. Fundamentals of Small Unmanned Aircraft Flight. Johns Hopkins Apl Technical Digest, 2012, V. 31(2), pp. 132-150.
6. Solero L., Lidozzi A., Pomilio J. A. Design of multiple-input power converter for hybrid vehicles. IEEE Trans. Power Electron. Sep. 2005. Vol. 20, № 5. P. 1007-1016.
7. Shukla A. K., Prem Kumar T. Materials for next-generation lithium batteries. Current Science, 2008, V. 94, № 3.

СПОСОБ КОНТРОЛЯ ЛИТИЙ ПОЛИМЕРНОЙ АККУМУЛЯТОРНОЙ БАТАРЕИ БЕСПИЛОТНОГО ВОЗДУШНОГО СУДНА

В статье рассмотрены основные классы беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и возможности их использования. Определены основные типы элементов питания БПЛА. Целью работы является обеспечение электрического питания для безаварийного полета БПЛА. Предложен способ неразрушающего контроля состояния литиевых перезаряжаемых автономных источников электроэнергии (ПАИЭ) на борту БПЛА с помощью фиксации его текущей температуры. Приведены результаты опыта контроля температуры реальной системы с использованием оптико-электронного тепловизора. На основе полученных данных сделан вывод, что температурный сигнал может быть использован в качестве критерия включения дополнительной батареи или срочной посадки БПЛА.

Ключевые слова: аккумуляторный автономный источник тока, литий-полимерные аккумуляторы, тепловизор, разрядная характеристика, беспилотное воздушное судно, температурный контроль.

METHOD FOR CHECKING A LITHIUM-POLYMER BATTERY FOR UNMANNED AIRCRAFT

The article deals with the main classes of unmanned aerial vehicles (UAVs) and the possibilities of their use. The basic types of power supplies of the UAV are determined. The aim of the work is to provide electric power for the UAV accident-free flight. The method of non-destructive control of the state of lithium rechargeable autonomous power sources (RAPS), on board the UAV by means of fixing its current temperature is proposed. The results of the experiment of temperature control of the real system using the optoelectronic thermal imager are presented. It was concluded on the basis of the obtained data, that the temperature signal can be used as a criterion for switching on an additional battery or stopping flight.

Key words: rechargeable autonomous current source, lithium-polymer batteries, thermal imager, discharge characteristic, unmanned aerial vehicle, temperature control.

ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

УДК 621.3.04: 621.313.001

Голубєва С.М.

Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля

Морнева М.О.

Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля

Торопов А.С.

Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля

ПОРІВНЯЛЬНА ОЦІНКА СИСТЕМ ГРАФІЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ І ПРИНЦИПІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЕКТУВАННЯ ПІД ЧАС ВИКОРИСТАННЯ СТУДЕНТАМИ ІНЖЕНЕРНИХ СПЕЦІАЛЬНОСТЕЙ

З метою визначення ефективної системи графічного моделювання для впровадження в навчальний процес із дисциплін електротехнічного напрямку проводиться аналіз сучасних програмних продуктів. Зроблено висновок про доцільність використання в області графічного моделювання програмних систем AutoCAD, «Компас» та Microsoft Visio.

Ключові слова: програмний продукт, графічний редактор, твердотільне моделювання, геометрична модель, проектування поверхонь, конструкторська документація, автоматизація.

Постановка проблеми. Нині під час виготовлення креслень та іншої конструкторської документації системи графічного моделювання практично повністю витіснили традиційний спосіб креслення – кульман. Використання комп'ютера надає студентам ВНЗ, конструкторам і технологам безліч переваг у виготовленні креслень, звільняє їх від рутинної роботи, а також різко підвищує продуктивність праці (за деякими оцінками в 2–2,5 раза).

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Системи графічного моделювання орієнтовані на роботу в інтерактивному режимі, надаючи проєктувальникові оперативний доступ до графічної інформації, просту і ефективну мову управління її обробкою з практично необмеженими можливостями контролю результатів. Зрештою, вдається автоматизувати саму трудомістку частину роботи (у процесі традиційного проєктування на розробку й оформлення креслень припадає близько 70% від загальних трудовитрат конструкторської роботи, 15% – на організацію і ведення архівів, і 15% – власне на проєктування, що включає розробку конструкції, розрахунки, узгодження тощо).

Постановка проблеми. Першим, найбільш значним результатом в області розробки програм-

них засобів моделювання є створення інтерактивних графічних редакторів (систем автоматизованого креслення CADD – Computer-Aided Design and Drafting).

Спеціалізація графічних редакторів привела до появи цілої низки утиліт, одні з яких вбудовуються в ядро редактора, а інші застосовуються як незалежні сервісні програми [4, с. 5]. Нині розвиток програмних засобів відбувається в напрямі вирішення досить невеликого кола проблем, до яких, насамперед, належать ефективність твердотільного моделювання, параметризація, а також асоціативність і програмний інтерфейс.

Метою статті є визначення ефективної графічної системи для впровадження в навчальний процес із дисциплін електротехнічного напрямку, проведення аналізу сучасних програмних продуктів. У цій статті розкриваються принципи автоматизації проєктування, а також розглядаються питання архітектури та інформаційного забезпечення системи графічного моделювання, проводиться порівняльний аналіз найбільш поширених систем графічного моделювання: CATIA, AutoCAD, I-DEAS, Unigraphics, «Компас» та Microsoft Visio.

Виклад основного матеріалу дослідження. Нині існують двомірні і тримірні графічні

системи. Двовірні графічні системи широко застосовуються за умови автоматизації креслярських робіт. Креслення будь-якої складності будуються з базових графічних елементів: точок, прямих, кіл та інших кривих. Кожен із цих елементів задається групою характерних точок, координати яких можуть визначатися в абсолютній (світової) системі координат або щодо попередньо введеної точки (інкрементне введення). При цьому використовують кілька способів завдання точок: зазначенням на екрані за допомогою миші; введенням чисел із клавіатури; «прив'язкою» до деякого елементу креслення, в околиці якого розташовується покажчик.

Перший спосіб використовують в основному для створення ескізів, а другий і третій – для побудови точних зображень. Особливо зручним є третій спосіб, який дає змогу «захопити» найближчий до курсора вже побудований елемент і ввести точні координати кінця або середини відрізка, центру кола, точки перетину прямих тощо.

У тримірних системах використовуються точки з трьома координатами, що дає змогу автоматично встановлювати проєкційні зв'язки. Так, у цьому разі куб описується вісьмома трьохмірними точками XYZ, за якими знаходяться проєкції XY, YZ і XZ. Під час використання таких систем зазвичай починають із побудови тримірного зображення, а двовірні види формуються на останньому етапі, під час виведення креслень. Використання тривимірних систем нині вже не стримується вартістю програмних засобів і устаткування [4, с. 22].

Відповідно до вищевикладеного виділимо два підходи до конструювання виробів.

Перший підхід базується на двовірній геометричній моделі – графічному зображенні і використанні комп'ютера як електронного кульмана, що дає змогу значно прискорити процес конструювання і поліпшити якість оформлення конструкторської документації. Центральне місце в цьому підході до конструювання займає креслення, яке служить засобом графічного представлення виробу, що містить інформацію для вирішення графічних завдань, а також виготовлення виробу.

В основі другого підходу лежить комп'ютерна просторова геометрична модель виробу, яка є більш наочним способом подання оригіналу. При цьому креслення відіграє допоміжну роль, а методи його створення засновані на методах комп'ютерної графіки, методах відображення просторової моделі.

Нині застосовують близько десяти найпоширеніших систем геометричного моделювання.

Універсальні програмні продукти представлені такими загальноновизнаними продуктами, як: CATIA, AutoCAD, I-DEAS, Unigraphics, «Компас» та Microsoft Visio. Коротко охарактеризуємо вибрані продукти.

1. Система CATIA. Система CATIA, розроблена французькою фірмою Dassault Systemes, з'явилася на світовому ринку в 1981 р. Спочатку вона призначалася для літакобудування, але поступово знайшла застосування в автомобільній промисловості та інших галузях. Нині система CATIA поширюється фірмою IBM і активно використовується такими фірмами, як Boeing, Chrysler, ГАЗ і ВАЗ.

Система CATIA має одну з найдосконаліших методик проєктування поверхонь (модулі Surface Design, Advanced Surface Design, FreeForm Design) і аналізу їх якості за кривизною, гладкістю, безперервністю в областях сполучення тощо. За необхідності поверхневі моделі можуть бути перетворені на твердотільні. Складні криві будуються на базі кривих Безьє. Поверхні, які не можна описати стандартними типами елементів, можуть бути апроксимувати точками із заданими координатами, за якими будуються біпараметричні поліноміальні функції.

2. Система фірми Autodesk, на ній AutoCAD. Найбільш поширеним і відомим програмним продуктом фірми Autodesk є пакет AutoCAD, перші версії якого були орієнтовані на двовірне креслення і випуск конструкторської документації. У процесі вдосконалення цей пакет перетворився на розвинуту середу тривимірного моделювання проєктів в архітектурі, будівництві, машинобудуванні, картографії та інших галузях. Останні версії пакету AutoCAD можуть виконуватися як на персональних комп'ютерах під управлінням DOS, Windows, Windows NT, так і на UNIX-платформах (Silicon Graphics, Hewlett-Packard, Sun SPARC-Station, IBM R/6000). Ядро системи написано мовою C++ і являє собою об'єктно-орієнтоване середовище, що є основою для безлічі прикладних програм, що створюються як самою фірмою Autodesk, так і її партнерами. Їх число вже перевищило 5 000.

Процес створення трьохмірних моделей в AutoCAD Designer відбувається в два етапи: спочатку задається плоский ескіз деталі, а потім йому надається третій вимір. Під час конструювання складальної одиниці користувачеві досить задати параметричні зв'язки між наявними об'єктами, обмежуючи число ступенів свободи проєктованої механічної системи. Для розроблених моде-

лей автоматично генеруються двомірні проєкції (види), причому постійно діє двонаправлений параметричний зв'язок модель-креслення. Це дає змогу завдяки можливостям параметричного креслення вносити зміни як на самій тривимірній моделі, так і на її двомірних видах шляхом коригування окремих розмірів. У модулі також є вбудовані функції, які виявляють взаємне пересічення деталей у складальних одиницях.

3. *Система I-DEAS*. Торгова марка I-DEAS об'єднує цілу низку програмних продуктів, які можна розглядати як інтегрований комплекс CAD/CAM/CAE. Ці програмні засоби створені фірмою SDRC (Structural Dynamics Research Corporation) і призначені для автоматизації розробки металевих конструкцій в аерокосмічній, автомобільній та інших галузях промисловості. Помітними особливостями I-DEAS є можливість розподілу користувальницьких ліцензій за неоднорідними локальними мережами, які містять робочі станції різних виробників (HP, IBM, SUN та ін.), а також наявність вбудованих засобів кінцево-елементного моделювання, оптимізації та автоматизації випробувань. Крім того, «історія» процесу проєктування запам'ятовується у вигляді дерева, будь-яку гілку якого можна редагувати.

У 2001 р. у результаті об'єднань компаній Unigraphics Solution з SDRC, система I-DEAS перестала розвиватися. Використання вдалих рішень двох систем I-DEAS і Unigraphics (UG) було інтегровано в систему Unigraphics NX.

4. *Система Unigraphics*. Система Unigraphics фірми EDS широко поширена в аерокосмічній і автомобільній промисловості, а також машинобудуванні. Її відмінними рисами є наявність засобів гібридного тримірного моделювання, асоціативної бази даних, розвинених засобів моделювання складальних вузлів і створення креслень. До складу системи Unigraphics входить кілька десятків модулів, основними з яких є:

- UG/Solid Modeling – базовий модуль тримірного гібридного моделювання (дротяного, поверхневого, твердотілого та їх модифікацій);
- UG/Freeform Modeling – модуль трьохмірного моделювання складних «скульптурних» поверхонь;
- UG/Drafting – модуль автоматизованого креслення, який підтримує всі основні промислові стандарти (ANSI, ISO, DIN, JIS) і включає в себе засоби формування ортогональних і ізометричних проєкцій, розрізів, перетинів тощо;
- UG/Mechanisms – модуль проєктування і моделювання двомірних і тримірних механічних систем

безпосередньо в середовищі пакету Unigraphics, що дає змогу здійснювати повний кінематичний аналіз, оцінити зазори між елементами, виявити зіткнення, обчислити сили, моменти тощо.

5. *Система «Компас»*. «Компас» – сімейство систем автоматизованого проєктування з можливостями оформлення проєктної та конструкторської документації відповідно до стандартів серії ЕСКД і СПДБ. Розробляється російською компанією «Аскон».

«Компас» випускається в кількох редакціях: «Компас-Графік», «Компас-СПДС», «Компас-3D», «Компас-3D LT», «Компас-3D Home». «Компас-Графік» може використовуватися і як повністю інтегрований у «Компас-3D» модуль роботи з кресленнями й ескізами, і як самостійний продукт, який надає засоби вирішення завдань 2D-проєктування та випуску документації.

Система має простий і зрозумілий інтерфейс, який дає змогу швидко засвоїти функціонал і приступити до роботи. Щоб перші кроки роботи в системі були легшими, КОМПАС-3D містить інтерактивні уроки для вивчення основного інструментарію, які зібрані в «Азбуці КОМПАС-3D». Ця азбука допоможе вам на готових прикладах розібратися в можливостях КОМПАС-3D і в найкоротші терміни почати вирішувати робочі завдання. «Азбука КОМПАС-3D» містить приклади: створення твердотілої і поверхневої моделі, створення деталей і складальних одиниць, створення листових деталей, колективної роботи над збірками.

6. *Система Microsoft Visio*. Microsoft Visio – редактор діаграм для Windows і редактор векторної графіки. Доступний у двох версіях, стандартний і професійний. Додаток був уперше створений у 1992 р. компанією Шейпвере (Shapeware corporation).

Microsoft Visio – незалежна система побудови діаграм, що пропонує засоби для наочного уявлення ідей, інформації і систем. Visio дає змогу визначати і документувати будь-які складні конструкції, з якими ви стикаєтеся у своїй повсякденній роботі, і пропонує можливість ефективного обміну ідеями та інформацією. Крім цього, використання діаграм Visio в документах Office дає змогу представити інформацію в більш стислому вигляді, зробити основну ідею такою, що більше запам'ятовується, й усунути багато технічних і культурних бар'єрів.

Основний засіб представлення даних у Visio – це векторні фігури, на основі яких будується діаграма або план. Заради зручності фігури

згруповані по тематичних категоріях, у кожній з яких можна побачити схожі на вигляд або за темою елементи. Фігури відображаються на однойменній області завдань. Із метою додавання фігури у проєкт треба просто перетягнути її на робочу область, після чого можна відкоректувати її розміри, задати властивості і параметри відображення.

Аналіз результатів. Проведено аналіз використання студентами технічних спеціальностей описаних програм при вивченні електротехнічних дисциплін (табл. 1) [5, с. 46]. Згідно з табл. 1, найбільшу затребуваність мають три продукти (AutoCAD, «Компас», Microsoft Visio). Це означає, що модель накреслити в них простіше, немає необхідності знайомитися з мовою системної графіки.

За кількістю можливих реалізацій однієї і тієї самої моделі різними засобами найкращим продуктом варто вважати програму AutoCAD та «Компас».

Для підвищення об'єктивності порівняння потрібне додаткове дослідження із залученням досить широкого кола експертів.

Висновки. Цю роботу можна розглядати як заділ у складанні порівняльної оцінки програмних систем графічного моделювання.

За результатами роботи представляється, що системи графічного моделювання необхідно розглядати як нерозривну сукупність «користувачі – технічні засоби – ПЗ проектування». Керуючись цим принципом, основні класифікаційні характеристики систем можна розбити на такі групи:

Таблиця 1
Порівняння систем графічного моделювання використовуваних студентами під час вивчення вишівських технічних дисциплін

Засіб графічного моделювання	Відсоток вивчення студентами засобу графічного моделювання
AutoCAD	100
«Компас»	100
Microsoft Visio	90
CATIA	10
I-DEAS	0
Unigraphics	10

1. загальні характеристики, що визначають взаємодію систем як єдиного цілого (призначення і спосіб організації інформаційних потоків);

2. програмні характеристики, що розділяють системи за окремими особливостями програмних рішень (спеціалізація, організація внутрішньої структури, функціональне розширення, обмін інформацією, спосіб створення змінюваних прототипів, методи моделювання функцій);

3. технічні характеристики, що визначають особливості використовуваних у системах графічного моделювання засобів обчислювальної техніки і периферійного обладнання;

4. ергономічні характеристики, що оцінюють ефективність взаємодії користувача із програмно-технічними засобами.

Список літератури:

1. Михайленко В.Е. Геометрическое моделирование и машинная графика в САПР: Учебник для студентов вузов по специальности «Системы автоматизированного проектирования» / В.Е. Михайленко, В.Н. Кислокий, А.А. Ляшенко и др. Киев: Вища шк., 1991. 373 с.
2. Кудрявцев Е.М. Mechanical Desktop Power Pack. Основы работы в системе. М.: ДМК Пресс, 2001. 544 с.
3. Климов А.С. Форматы графических файлов. Киев: НИПФ «ДиаСофт Лтд.», 1995. 479 с.
4. Пашкевич А.П. Основы систем автоматизированного проектирования: Метод. Пособие / А.П. Пашкевич, О.А. Чумаков. Мн.: БГУИР, 2004. 48 с.
5. Голубева С.М. Порівняльна оцінка програмних пакетів комп'ютерного моделювання інженерних процесів / С.М. Голубева, М.О. Морнева. Вісник СХУ ім. В. Даля. 2017. № 3 (233). С. 44–47.

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА СИСТЕМ ГРАФИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ПРИНЦИПОВ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СТУДЕНТАМИ ИНЖЕНЕРНЫХ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ

С целью определения эффективной системы графического моделирования для внедрения в учебный процесс по дисциплинам электротехнического направления, проводится анализ современных программных продуктов. Сделан вывод о целесообразности использования в области графического моделирования программных систем AutoCAD, «Компас» и Microsoft Visio.

Ключевые слова: программный продукт, графический редактор, твердотельное моделирование, геометрическая модель, проектирование поверхностей, конструкторская документация, автоматизация.

**COMPARATIVE ASSESSMENT OF GRAPHIC MODELING SYSTEMS AND DESIGN
AUTOMATION PRINCIPLES WHEN USING ENGINEERING PROFESSIONS
BY UNIVERSITY UNDERGRADUATES**

In order to determine an effective graphical modeling system for introduction into the educational process in the disciplines of electrical engineering, an analysis of modern software products is carried out. The conclusion is made about the expediency of using the AutoCAD, "Compass" and Microsoft Visio software systems in the field of graphical modeling.

Key words: *software, graphics editor, solid modeling, geometric model, surface design, design documentation, automation.*

УДК 621.3.082.62

Кириченко О.С.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Білюк І.С.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Шарейко Д.Ю.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Фоменко А.М.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Гаврилов С.О.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Бугрім Л.І.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

ЧИСЕЛЬНЕ ТРИМІРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО ОХОЛОДЖУВАЧА ВИМІРЮВАЛЬНОГО ЕЛЕКТРОУСТАТКУВАННЯ АВТОМАТИЧНИХ СИСТЕМ

У статті викладено основні результати чисельного тримірного моделювання термоелектричного охолоджувача вимірювального електроустаткування автоматичних систем. У дослідженні побудовано тримірну математичну модель термоелектричного охолоджувача з габаритними розмірами 23×23 мм, який містить 71 P-N-перехід. На основі тримірної математичної моделі отримано картини розподілу електричного потенціалу, густини струму, напруженості електричного поля, стаціонарного теплового поля та резистивного нагріву з об'єму термоелектричного охолоджувача. Також досліджено вплив матеріалу контактних пластин між напівпровідниками P- та N-типу на ефективність термоелектричного охолодження.

Ключові слова: термоелектричний охолоджувач, ефект Пельтьє, напівпровідник, контактна пластина, вимірювальне електроустаткування.

Постановка проблеми. Термоелектричні охолоджувачі широко використовуються в специфічному електроустаткуванні сучасних автоматичних систем. Це пов'язано з повною неможливістю функціонування більшості компресорних систем охолодження в нахиленому або перевернутому стані через особливості геометрії конструкцій багатьох вимірювальних приладів автоматичних систем. Прикладом подібних вимірювальних приладів є віскозиметри, денсиметри, реометри або рефрактометри. Отримані дані з цих вимірювальних приладів використовується як інформація для зворотних зв'язків за відповідними параметрами в автоматичних системах для забезпечення необхідних процесів керування.

Наприклад, сучасні віскозиметри комплектуються вбудованим термоелектричним охолодженням для підтримки часто необхідних температур

20 або 25°C, при цьому можна відмовитись від зовнішнього охолодження шляхом використання віскозиметричних термостатів з вбудованим охолодженням на елементах Пельтьє, які є надзвичайно компактними і економлять простір приміщення. Денсиметри, які використовують у вимірюваннях густини рідин і твердих тіл, також комплектуються вбудованим термостатом на елементах Пельтьє, при цьому температурний діапазон може становити від 15°C до 70°C. Реометри також містять унікальні температурні системи на елементах Пельтьє, що дає змогу швидко і точно контролювати температуру для вимірювань у діапазоні від 0°C до 180°C, завдяки спеціальній комплексній системі повітряного контр-охолодження немає необхідності у зовнішньому рідинному термостаті.

Дослідження термоелектричних охолоджувачів вимірювального електроустаткування автома-

тичних систем дуже часто проводять із використанням систем автоматизованого проектування [1; 2; 9; 12], із використанням чисельних методів розрахунку [4; 10; 11].

Як зазначалось вище, термостати з вбудованими термоелектричними охолоджувачами на тепер набули значного поширення в сучасному вимірювальному електроустаткуванні автоматичних систем, проте термоелектричні охолоджувачі, на яких вони побудовані, продовжують розвиватись шляхом удосконалення або оновлення конструкцій і використання в них різних електротехнічних матеріалів та їх сполук. Цей розвиток супроводжується тим, що наявні математичні моделі або не здатні, або не повною мірою придатні для нових конструкцій термоелектричних охолоджувачів. Тому актуальними залишаються питання чисельного моделювання термоелектричних охолоджувачів вимірювального електроустаткування автоматичних систем.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Чисельному моделюванню прямого та зворотного термоелектричного ефекту присвячена значна кількість робіт. Дослідження в цих роботах спрямовані на створення нових конструкцій термоелектричних модулів і сполук термоелектричного матеріалу для підвищення ефективності використання термоелектричного ефекту.

У роботі [2] розроблено метод комп'ютерного проектування термоелектричних систем конверсії теплової енергії океану. Ефективність методу продемонстровано на прикладі конкретної фізичної моделі подібної системи. Крім того, визначено оптимальні параметри термоелектричного генератора, за яких досягається максимум генерації потужності з урахуванням втрат на власні потреби.

Результати теоретичних і експериментальних досліджень датчиків теплового потоку, виготовлених за технологією термоелектричних мікромодулів, наведено в [3]. Проаналізовано вплив термоелектричного матеріалу й параметрів конструкції модулів на основні характеристики подібних датчиків. Розроблено термоелектричні датчики нових серій, які порівняно з відомими мають більш високу абсолютну чутливість, суттєво більш високу, ніж у датчиках на основі диференціальних термопар швидкодію та ін.

У роботі [7] розглянуто основні технологічні операції створення термоелектричних перетворювачів енергії на основі телуриду германію. Проаналізовано використання термоелектричних модулів як термоелектричних холодильників та

підвищення ефективності роботи таких пристроїв у разі використання легованих сполук телуриду свинцю. Також створено дослідний зразок термоелемента та побудовано залежності величини термо-ЕРС від різниці температур.

Узагальнену математичну модель процесу нестационарного термоелектричного охолодження запропоновано в [8]. Сформульовано задачу оптимального керування нестационарним термоелектричним охолоджувачем з довільним числом каскадів, яка полягає у визначенні оптимальної залежності струму живлення від часу, що забезпечує мінімальну температуру охолодження. Запропоновано метод її вирішення та наведено приклади комп'ютерного моделювання оптимальних функцій керування процесом нестационарного охолодження.

В [12] на основі комп'ютерної 3D-моделі проникного термоелемента для охолодження потоків рідин та газів чисельно розраховано енергетичні характеристики термоелемента з елементів на основі Bi-Te-Se-Sb. Досліджено вплив швидкості прокачки теплоносія та напруги живлення термоелемента на перепад температур й характеристики перетворення енергії.

Метою статті є висвітлення результатів чисельного тримірного моделювання термоелектричного охолоджувача, що застосовується у вимірювальному електроустаткуванні автоматичних систем, а також встановлення впливу матеріалу контактних пластин між термоелектричним матеріалом на ефективність термоелектричного охолодження.

Виклад основного матеріалу дослідження. Для опису термоелектричних процесів використовується потужний математичний апарат у вигляді системи диференціальних рівнянь. У загальному випадку основні рівняння для термоелектричних, термомагнітних і гальванотермомагнітних явищ щодо процесів розповсюдження тепла та електрики в кристалах такі [1]:

$$\left. \begin{aligned} E_i^* &= \rho_{ik} j_k + \alpha_{im} \frac{\partial T}{\partial x_m}, \\ q_l &= T \alpha_{kl} j_k - \chi_{lm} \frac{\partial T}{\partial x_m}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

де $E_i^* = -\frac{1}{e} \nabla_i \bar{\mu}$ – компонента напруженості електричного поля;

ρ_{ik} – компонента тензора питомого електроопору;

α_{kl} – компонента тензора термоЕРС;

q_l – компонента вектора густини теплового потоку;

j_k – компонента вектора густини електричного струму;

χ_{im} – компонента тензора теплопровідності;
 φ – електрохімічний потенціал носіїв струму;
 e – заряд носіїв струму;

x_m – декартові координати, індекси i, k, l, m пробігають значення 1, 2, 3, причому по двічі зустрічних індексах ведеться сумування.

У неізотермічному неоднорідному або анізотропному середовищі за наявності градієнта температури напруженість електричного поля E_i^* , згідно з першим рівнянням (1), містить не тільки омичний складник $\rho_{ik}j_k$, але також напруженість поля сторонніх сил неелектричної природи:

$$E_i^* = \alpha_{im} \frac{\partial T}{\partial x_m}, \quad (2)$$

що називається термоелектричним полем.

ТермоЕРС у замкнутому контурі C , згідно із загальним визначенням ЕРС, може бути представлена у вигляді:

$$E = \oint_C E_i^* dl = \oint_C \alpha_{im} \frac{\partial T}{\partial x_m} dx_i. \quad (3)$$

Для виконання чисельного тримірного моделювання термоелектричного охолоджувача вимірювального електроустаткування автоматичних систем необхідно, по-перше, створити його точну тримірну геометричну модель. При цьому слід зазначити, що геометричне моделювання є складником математичного моделювання. Таке моделювання використовується як на етапах проектування, так і в процесі розробки конструкторської документації в різних галузях промисловості.

Далі, по-друге, необхідно створити реалістичну тримірну модель термоелектричного охолоджувача, яка, окрім зручної зовнішньої візуалізації електротехнічних матеріалів, містить дані про фізичні властивості всіх електротехнічних матеріалів. Створення математичної моделі проводилось з урахуванням досвіду вирішення польових задач електротехніки та електроенергетики, викладених у [4–5]. На рис. 1 показано тримірні моделі термоелектричного охолоджувача вимірювального електроустаткування автоматичних систем.

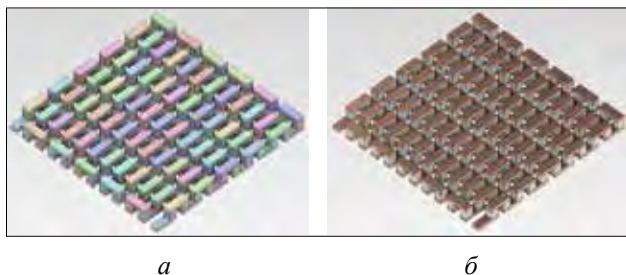


Рис. 1. Геометрична (а) та реалістична (б) тримірні моделі термоелектричного охолоджувача

Тримірна модель термоелектричного охолоджувача складається з напівпровідникових матеріалів Р- та N-типу, кожен напівпровідник має однакову форму куба з довжиною ребра 1 мм. Напівпровідникові матеріали Р- та N-типу з'єднані по чергово між собою металевими контактними пластинами, що мають однакову форму паралелепіпедів розмірами $1 \times 0,5 \times 3$ мм. Перша та остання контактні металеві пластини являють собою контактні виводи для під'єднання проводів електроживлення. Ланцюг з напівпровідникових елементів і їх металевих контактних пластин містить 71 Р-N-перехід і являє собою форму «П-подібної змійки», яку розміщено таким чином, що габаритні розміри спроектованого термоелектричного охолоджувача становлять 23×23 мм товщиною 2 мм (без урахування товщини двох керамічних пластин ізоляційного корпусу). Реалістична тримірна модель термоелектричного охолоджувача призначена для наочної візуалізації, а також містить потрібну для чисельного розрахунку інформацію про фізичні властивості електротехнічних матеріалів, що використано в моделі.

Перед проведенням чисельного розрахунку необхідно задати граничні умови щодо температури та електричного потенціалу. Вважалось, що температура зовнішніх поверхонь нагрітих контактних пластин була незмінною і становила 20°C . Також задано граничну умову про нульову величину електричного потенціалу на крайній торцевій поверхні останньої металеві контактної пластини.

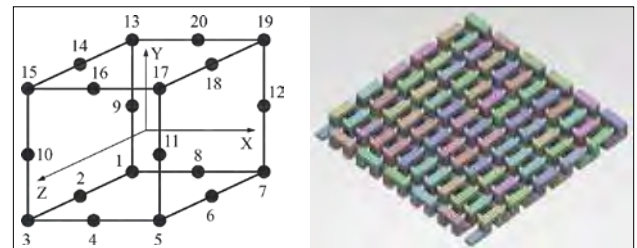


Рис. 2. Кубічний кінцевий елемент (а) та кінцево-елементна тримірна модель (б) термоелектричного охолоджувача

Чисельне вирішення тримірних задач, по-третє, передбачає створення кінцево-елементної моделі, що передбачає подолання суттєвих складностей у роботі з даними. До найбільш часто використовуваних кінцевих елементів відносять тетраедри, гексаедри, а також призматичні елементи. На рис. 2 а показано кубічний кінцевий елемент з двадцятьма вузлами. Функції

форми визначаються різними формулами залежно від розташування вузлів, які можуть знаходитись у вершинах або на сторонах, які паралельні осям [1]. Вибір типу використовуваного елемента залежить перш за все від галузі фізики вирішуваної задачі.

В електротехніці і термодинаміці для врахування зміни констант у переході від одного середовища до іншого часто використовуються лагранжеві елементи. Кінцево-елементна тримірна модель термоелектричного охолоджувача (рис. 2 б) містить 281 просторовий об'єкт, зокрема 143 контактні пластини, 71 напівпровідник P-типу та 71 напівпровідник N-типу. Число вузлів 158403 і число кінцевих елементів 24614 кінцево-елементної моделі потребувало значних обчислювальних потужностей.

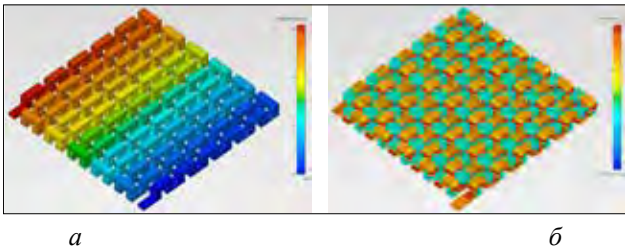


Рис. 3. Картина розподілу електричного потенціалу $\phi(x, y, z)$ (а) та густини струму $j(x, y, z)$ (б) по тримірній моделі термоелектричного охолоджувача з мідними контактними пластинами за сили струму 3А

Результати розрахунку містять дані про картину розподілу електричного потенціалу $\phi(x, y, z)$ (рис. 3 а) та густини струму $j(x, y, z)$ (рис. 3 б) по тримірній моделі термоелектричного охолоджувача з мідними контактними пластинами за сили постійного струму 3А. При цьому електричний потенціал ϕ розподілено по тримірній моделі термоелектричного охолоджувача в діапазоні від 0 до приблизно 6,2 В (рис. 3 а). З рис. 3 б видно, що найбільша густина струму $j = 7,2 \cdot 10^6$ А/м² спостерігається в металевих контактних пластинках між P-N-переходами та на крайніх контактних пластинках, це пояснюється геометрією спроектованого термоелектричного охолоджувача, а саме найменшою площею поперечного перерізу в проходженні струму в зазначених місцях пластин.

На рис. 4 а проілюстровано картину розподілу електричного поля по тримірній моделі термоелектричного охолоджувача з мідними контактними пластинами за сили постійного струму 3А. При цьому максимальна величина напруженості електричного поля $E = 51,7$ В/м спостерігається в напівпровідникових матеріалах термоелектричного охолоджувача.

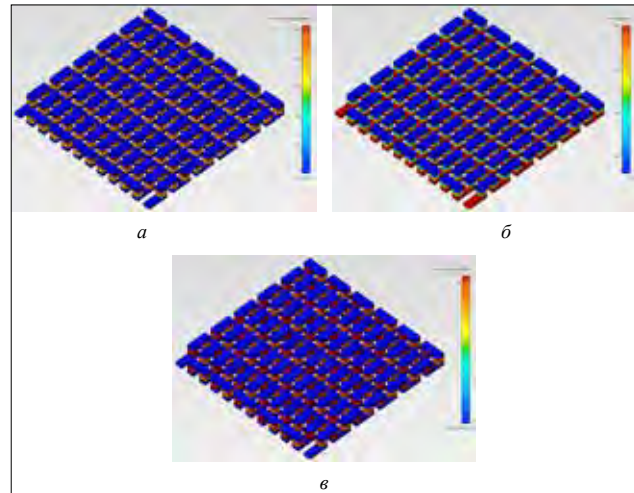


Рис. 4. Картина розподілу електричного поля $E(x, y, z)$ (а), стаціонарного теплового поля $t(x, y, z)$ (б), резистивного нагріву $Q(x, y, z)$ (в) по тримірній моделі термоелектричного охолоджувача з мідними контактними пластинами за сили струму 3А

Картину розподілу стаціонарного теплового поля $t(x, y, z)$ по тримірній моделі термоелектричного охолоджувача приведено на рис. 4 б. Слід зазначити, що чисельні розрахунки температурного поля термоелектричного охолоджувача проводились в адіабатичному режимі. Таким чином оцінювалась верхня межа для температури без урахування конвекції та теплового випромінювання, а отже, отримана картина температурного поля відповідає більш напруженому режиму роботи термоелектричного охолоджувача.

На рис. 4 в наведено картину розподілу резистивного нагріву $Q(x, y, z)$ по тримірній моделі термоелектричного охолоджувача з мідними контактними пластинами за сили постійного струму 3А. Максимальний резистивний нагрів спостерігається в напівпровідниках і становить $Q = 9,5 \cdot 10^7$ Вт/м³.

На основі отриманої чисельної тримірної математичної моделі термоелектричного охолоджувача вимірювального електроустаткування автоматичних систем побудовано графіки залежностей $t(I)$ (рис. 5 а) температури t від сили постійного струму I у його варіаціях від 0 до 3А за застосування різних металів матеріалами контактних пластин. Як видно з графіка (рис. 5 а), в діапазоні струму від нуля до значення 0,8А температурні криві для всіх матеріалів контактних пластин співпадають, у діапазоні струмів понад 0,8А криві різні. Слід зазначити, що найбільший термоелектричний ефект охолодження досягнуто за використання контактних пластин з міді (крива 1 на рис. 5 а). За сили постійного струму 3А зовнішня поверхня холодних

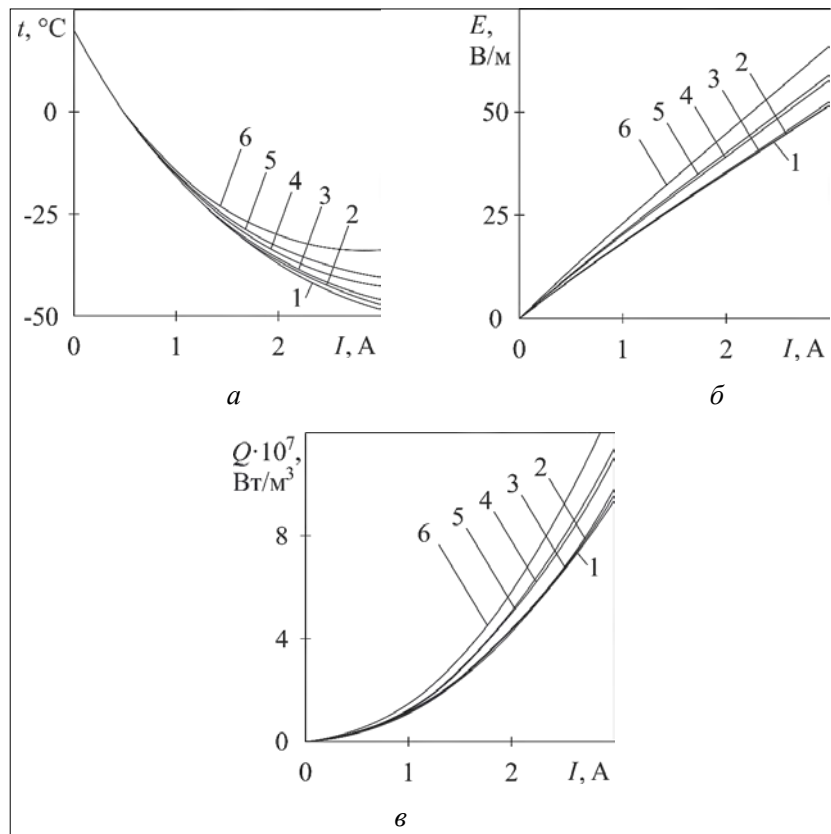


Рис. 5. Графіки залежностей температури $t(I)$ на зовнішній поверхні охолоджених контактних пластин (а), напруженості $E(I)$ електричного поля (б) та резистивного нагріву $Q(I)$ (в) від сили постійного струму I через термоелектричний охолоджувач: 1 – для мідних пластин; 2 – для алюмінієвих пластин; 3 – для нікелевих пластин; 4 – для титанових пластин; 5 – для сталевих пластин; 6 – для вісмутових пластин

контактних пластин з міді охолоджується до температури $-47,6^{\circ}\text{C}$. Значення температури охолодження для зовнішніх поверхонь контактних пластин з алюмінію (крива 2 на рис. 5 а) та нікелю (крива 3 на рис. 5 а) за сили струму 3А становлять відповідно $-47,5^{\circ}\text{C}$ і -47°C .

Температура зовнішніх поверхонь контактних пластин з титану (крива 4 на рис. 5 а), сталі (крива 5 на рис. 5 а) та вісмуту (крива 6 на рис. 5 а) за сили струму 3А становлять відповідно $-42,2^{\circ}\text{C}$, $-41,1^{\circ}\text{C}$, $-33,8^{\circ}\text{C}$. Аналізуючи отримані результати, можна зробити висновок про недоцільність застосування перелічених матеріалів як контактних пластин, оскільки ефективність термоелектричного охолоджувача в разі їх застосування значно зменшується. Порівняно з міддю у разі застосування вісмуту за однакової сили струму 3А в обох випадках температура зовнішніх поверхонь контактних пластин буде меншою на $13,8^{\circ}\text{C}$.

Залежності $E(I)$ максимальної напруженості E електричного поля у напівпровідниках від сили постійного струму I у його варіаціях від 0 до 3А у разі застосування різних металів матеріалами кон-

тактних пластин показано на рис. 5 б. З графіка видно, що ці залежності є лінійними, максимум напруженості електричного поля у напівпровідниках становить $E = 66 \text{ В/м}$ за сили струму $I = 3 \text{ А}$ і застосування контактних пластин з вісмуту.

На рис. 5 в представлено залежності $Q(I)$ резистивного нагріву Q у напівпровідниках від сили постійного струму I у його варіаціях від 0 до 3А у разі застосування різних металів матеріалами контактних пластин. Найбільший резистивний нагрів $Q = 1,323 \cdot 10^8 \text{ Вт/м}^3$ спостерігається за сили струму $I = 3 \text{ А}$ і застосування контактних пластин з вісмуту.

Висновки.

У роботі створено чисельну тримірну математичну модель термоелектричного охолоджувача з габаритними розмірами $23 \times 23 \text{ мм}$.

Отримано картини розподілу електричного потенціалу $\phi(x, y, z)$, густини струму $j(x, y, z)$, напруженості електричного поля $E(x, y, z)$, стаціонарного температурного поля $t(x, y, z)$ та резистивного нагріву $Q(x, y, z)$ по тримірній моделі термоелектричного охолоджувача з мідними кон-

тактними пластинами за сили струму $I = 3\text{А}$. При цьому картина стаціонарного температурного поля підтверджує ефективність роботи термоелектричного охолоджувача, різниця між нагрітою та охолодженою поверхнями термоелектричного охолоджувача досягла $27,6^\circ\text{C}$.

Досліджено вплив матеріалу металевих контактних пластин між P-N-переходами на ефективність

термоелектричного охолодження. Встановлено, що найбільша ефективність досягається у разі використання контактних пластин з міді, а найменша ефективність за використання вісмутових пластин. Побудовано відповідні залежності для температури $t(I)$, напруженості $E(I)$ електричного поля та резистивного нагріву $Q(I)$ від сили постійного струму I у його варіаціях від 0 до 3А.

Список літератури:

1. Анатычук Л.И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства: справочник. К.: Наукова думка, 1979. 768 с.
2. Анатычук Л.И., Поляк В.М. Компьютерное проектирование термоэлектрического ОТЕС. *Термоелектрика*: Інститут термоелектрики НАН України та МОН України. К., 2015. № 2. С. 38–49.
3. Громов Г.Г., Глязер С.А., Захарцев Ю.В. Термоелектричні датчики теплового потоку. *Термоелектрика*: Інститут термоелектрики НАН України та МОН України. К., 2015. № 6. С. 82–90.
4. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. М.: Мир, 1975. 541 с.
5. Кириченко О.С., Костюченко В.І., Захаров Д.О. Моделювання стаціонарних теплових полів струмопровідних шин різного профілю. *Енергетика та комп'ютерно-інтегровані технології в АПК*. Харків: ХНТУСГ ім. Петра Василенка, 2017. № 1 (6). С. 60–63.
6. Кириченко О.С., Сидорика І.М., Марченко Д.Д. Електротепловий аналіз елементів навчально-дослідного стенду електротехнічної лабораторії. *Вісник аграрної науки Причорномор'я*. Миколаїв, 2017. Вип. 4 (96). С. 168–176.
7. Криськов Ц.А., Рачковський О.М., Оптасюк С.В. Технологія створення віток термоелектричних перетворювачів енергії. *Вісник Кам'янець-Подільського національного університету імені Івана Огієнка. Фізико-математичні науки*. Кам'янець-Подільський: КПНУ ім. Івана Огієнка, 2014. Вип. 7. С. 60–68.
8. Коцур М.П. Математичне моделювання та оптимізація процесу нестаціонарного термоелектричного охолодження. *Технологический аудит и резервы производства*. Харків, 2016. № 1/2(27). С. 29–34.
9. Кулон Жан-Луи, Сабоннадьєр Жан-Клод. САПР в електротехніці. М.: Мир, 1988. 208 с.
10. Норри Д., Фриз Ж. Введение в метод конечных элементов. М.: Мир, 1981. 304 с.
11. Сабоннадьєр Жан-Клод, Кулон Жан-Луи. Метод конечных элементов и САПР. М.: Мир, 1989. 192 с.
12. Черкез Р.Н., Феняк П.П., Дем'янюк Д.Д. Комп'ютерне моделювання проникного термоелемента охолодження. *Термоелектрика*: Інститут термоелектрики НАН України та МОН України. Київ, 2013. № 5. С. 64–74.

ЧИСЛЕННОЕ ТРЕХМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОХЛАДИТЕЛЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В научной статье изложены основные результаты цифрового трехмерного моделирования термоэлектрического охладителя измерительного электрооборудования автоматических систем. В исследовании построена математическая модель термоэлектрического охладителя с габаритными размерами 23×23 мм, который содержит 71 P-N-переход. На основе трехмерной математической модели получены картины распределения электрического потенциала, плотности тока, электрического поля, стационарного теплового поля и резистивного нагрева по объему термоэлектрического охладителя. Также исследовано влияние материала контактных пластин между полупроводниками P- и N-типа на эффективность термоэлектрического охлаждения.

Ключевые слова: термоэлектрический охладитель, эффект Пельтье, полупроводник, контактная пластина, измерительное электрооборудование.

NUMERICAL THREE-DIMENSIONAL MODELING OF THERMOELECTRIC COOLER FOR MEASUREMENT ELECTRICAL EQUIPMENT OF AUTOMATIC SYSTEMS

The scientific article presents the main results of numerical three-dimensional modeling of the thermoelectric cooler of measuring electrical equipment of automatic systems. The study built a mathematical model of a thermoelectric cooler with dimensions of 23×23 mm, which contains a 71 P-N-junction. On the basis of a three-dimensional mathematical model, the patterns of electric potential distribution, current density, electric field, stationary thermal field and Joule heat generation over the volume of a thermoelectric cooler are obtained. Also, the influence of the material of contact plates between P and N-type semiconductors on the thermoelectric cooling efficiency has been investigated.

Key words: thermoelectric cooler, Peltier effect, semiconductor, contact plate, electrical measuring equipment.

Коваленко М.А.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

Маляр І.В.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ СТЕНД З МАЛОПОТУЖНИМ ТРИФАЗНИМ АСИНХРОННИМ ДВИГУНОМ З КОРОТКОЗАМКНЕНИМ РОТОРОМ

Комплексні стенди призначені для визначення таких характеристик: вимірювання опору ізоляції обмоток; випробування ізоляції обмоток на електричну міцність; випробування міжвиткової ізоляції обмоток; вимірювання струму і втрат холостого ходу; вимірювання напруги і втрат короткого замикання; вимірювання активного опору обмоток; випробування постійної напруги з вимірюванням струму витоку; вимірювання мінімального пускового моменту; вимірювання максимального пускового струму; визначення коефіцієнта потужності; визначення ковзання; випробування під навантаженням (з протидією або з допоміжним моментом); визначення полярності включення котушок; вимірювання швидкості обертання; вимірювання моменту на валу; вимірювання температури; вимірювання вібрації; вимірювання рівня шуму. Стенд виступає оновленням матеріально-технічної бази лабораторії і допомагає майбутнім і нинішнім студентам працювати та отримувати знання на більш сучасному рівні та розширює уявлення про теорію електричних машин та електротехніки.

Ключові слова: асинхронний двигун з КЗ ротором, короткозамкнений ротор, лабораторний стенд, характеристики АД.

Вступ. Асинхронний двигун (АД) – це електрична асинхронна машина для перетворення електричної енергії на механічну. Робота асинхронного двигуна полягає у взаємодії між обертовим магнітним полем, яке виникає за проходження трифазного змінного струму по обмотках статора та полем ротора. Цей струм зустрічається з індуктованим полем статора в обмотках ротора, що створює механічну енергію, яка змушує ротор обертатися в напрямі обертання магнітного поля. При цьому частота обертання магнітного поля статора відрізняється від швидкості обертання ротора.

Матеріально-технічна база кафедри електромеханіки (в умовах фактичної відсутності фінансування з боку держави і з урахуванням важкого економічного становища) застаріває. Більшість із наявних стендів для дослідження характеристик машин морально застаріла і потребує оновлення.

Обладнання, що використовується для досліджень та для забезпечення навчального процесу, майже відпрацювало нормативний термін експлуатації. Крім того, є потреба в зменшенні встановлених потужностей експериментальних стендів з метою енергозаощадження.

Модернізація лабораторної бази вищих навчальних технічних закладів електромеханічного спрямування за участю студентів необхідна для розвитку та підтримки високого науково-технічного рівня підготовки майбутніх фахівців, а

також підтримки у належному стані обладнання для практичних та лабораторних занять.

Метою роботи є розробка експериментального стенду для дослідження асинхронного двигуна із короткозамкненим ротором для дослідницьких та навчальних потреб; а також безпосередньо оновлення матеріально-технічної бази кафедри електромеханіки на основі сучасної елементної бази.

Для розробки стенду необхідно більш детально розглянути конструкцію АД та зробити висновки щодо обраного типу ЕМПЕ – асинхронного двигуна з КЗ ротором.

Оскільки пускові моменти в цьому разі порівняно невеликі, то використання систем електропривода на базі АД з ФР не є виправданим. Окрім того, релейно-контакторна система керування передбачає лише ступінчасте регулювання швидкості та більш складна для включення її в сучасну автоматизовану систему. Недоліком АД з КЗ ротором є великий пусковий струм, який у 5–7 разів перевищує струм двигуна у роботі в номінальному режимі. Однак за його використання в системі електропривода типу ПЧ-АД цей недолік суттєво згладжується. Щодо системи ПЧ-АД, то вона характеризується широким діапазоном регулювання швидкості, а отримані характеристики мають високу жорсткість.

Тому в остаточному виборі двигуна наведемо таблицю основних переваг і недоліків, які наочно показують усі за та проти для кожного двигуна, що були описані вище.

Таблиця 1

Таблиця переваг і недоліків систем електродвигунів

Показники	Системи електричного приводу			
	РКС-ДПС	РКС-АД ДПС	РКС-АД ФР	ТП-Д
Діапазон регулювання швидкості	1:3	1:3	1:5000	1:20000
Жорсткість механічних характеристик	-	-	+	+
Перевантажувальна здатність	+	+	+	+
Економічність	-	-	+/-	+

Переваги цих двох методів полягають у такому:

- обмежене обслуговування;
- досить високий ККД у машинах з підвищеною енергоефективністю;
- високі та достатні динамічні властивості, обмежений струм у динамічних режимах, пусковий момент рівний або вищий номінального, низькі значення ковзання, обмежені навантаження на елементи конструкції ротора;
- ізолюваність від процесів у мережі живлення.

До недоліків цих двох методів можна віднести:

- необхідність незалежної вентиляції за глибокого регулювання швидкості;
- зміна параметрів схеми заміщення внаслідок нагріву, що ускладнює керування;
- високі значення dV , dt породжують стрес ізоляції;
- виникнення хвильових процесів у великих значеннях довжини з'єднувальних дротів.

Загальні відомості про виріб.

Стенд призначений для випробування асинхронних електродвигунів змінного струму частотою 50 Гц, напругою 220 і 380 В з короткозамкненими і фазними роторами, потужністю до 100кВт після капітального ремонту.

Схема стенда передбачає проведення прийнятно-здавальних випробувань електродвигунів з короткозамкненим та фазним ротором в обсязі вимог ГОСТ 183-74.

Встановлене на стенді обладнання дає змогу проводити такі види випробувань: дослід холостого ходу (ХХ) та дослід короткого замикання (КЗ).

Окрім цього, такі стенди дають змогу виміряти опір ізоляції обмоток щодо корпусу і між фазами обмоток; провести випробування ізоляції обмоток щодо корпусу на електричну міцність. Для збірки

експериментального стенду нам необхідні були асинхронний двигун, навантаження для асинхронного двигуна і регулятор напруги.

Був обраний асинхронний двигун, в якому замінили обмотку статора, також встановлений новий ротор з валом (рис. 1).

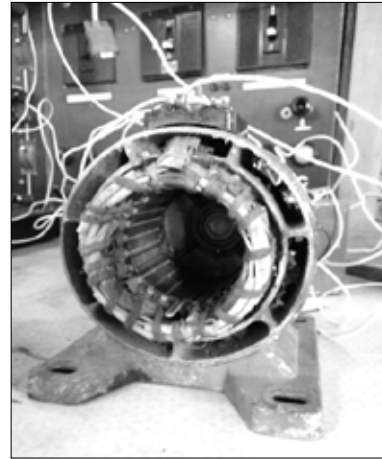


Рис. 1. АД із заміненою обмоткою статора

Оскільки нам необхідно було підключити навантаження для пуску асинхронного двигуна, ми обрали машину постійного струму в режимі генератора, що зображена на рисунку 2.

Після цього ми з'єднали за допомогою муфти машину постійного струму та асинхронний двигун.

Згодом необхідно було під'єднати регулятор напруги до АД.

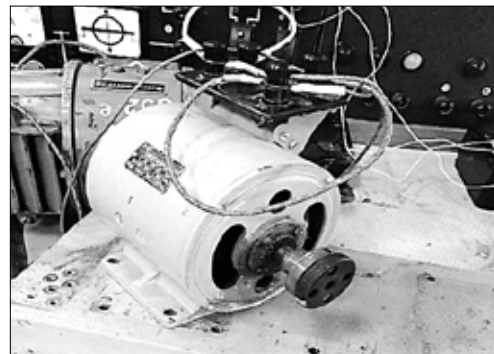


Рис. 2. Машина постійного струму

Позаяк схема підключення живлення була зібрана за схемою «зірка», а інвертор для точної роботи потребував схему «трикутник», була виконана робота з переключення двигуна на схему «трикутник».

Для забезпечення плавного регулювання і швидкодії розроблена спеціальна схема перетворювача напруги. Його використання значною мірою збільшує час безперервної роботи

трифазного двигуна і економить електроенергію. Перетворювач дає змогу довести ККД до 98%. Це досягається збільшенням частоти комутації. Механічні регулятори на таке не здатні.

Дія подібного перетворювача ґрунтується на принципі подвійного перетворення напруги.

1. На початковому етапі виконується регулювання напруги мережі шляхом його випрямлення і фільтрування, що досягається за допомогою використання системи конденсаторів.

2. Далі настає черга електронного управління, завдяки якому для струму виставляється частота, відповідна заздалегідь обраному режиму.

3. У результаті виникають прямокутні імпульси, які коригуються обмоткою статора двигуна, що дає змогу вивести її на рівень синусоїди.



Рис. 3. Прямокутні імпульси, які коригуються обмоткою статора двигуна

Наведена нижче схема на рисунку 4 розрахована для живлення трифазного двигуна, який буде використовуватися в стенді. Пристрій призначений для двигуна, потужність якого не перевищує 0,55 кВт. Це забезпечує запас потужності, оскільки обраний двигун для стенду має потужність 0,275 кВт.

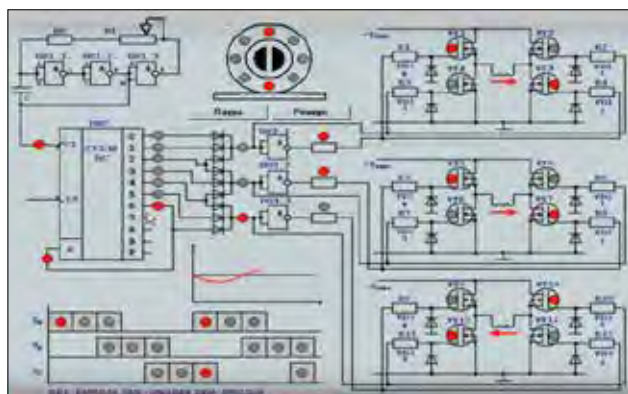


Рис. 4. Схема живлення трифазного двигуна потужністю 0,275 кВт

Після того, як всі основні компоненти були готові для підключення до експериментального стенду, була спроектована блок-схема стенду.

Спочатку було під'єднано машину постійного струму та асинхронний двигун до мережі,

а згодом відбулося під'єднання регулятора напруги до асинхронного двигуна та тахометра. Після монтажу стенду та підключення його до мережі можуть бути зняті характеристики двигуна в різних режимах роботи: холостий хід, режим короткого замикання, режим робочого ходу.

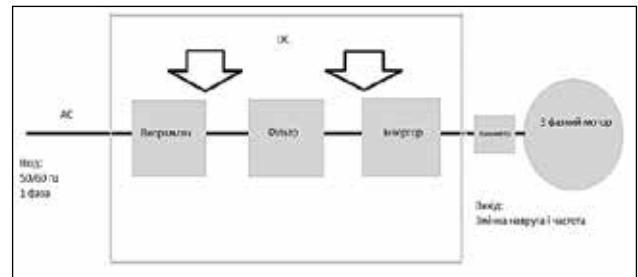


Рис. 5. Структурна блок-схема стенду

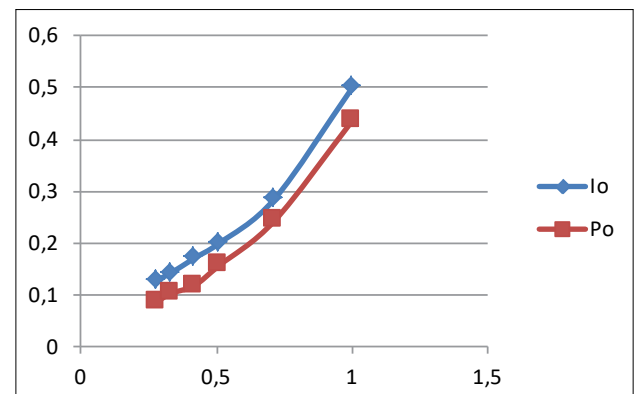


Рис. 6. Характеристика холостого ходу двигуна

Значення параметрів двигуна у відносних одиницях відображено у вигляді таблиці 2.

Наступним режимом двигуна, в який ми його переводили, був режим короткого замикання. Режим короткого замикання робився заклинюванням ротора або примусовою його зупинкою, гальмуванням, у такому режимі струм статора перевищує значення номінального струму в 5–7 разів. Цей режим є короткочасним.

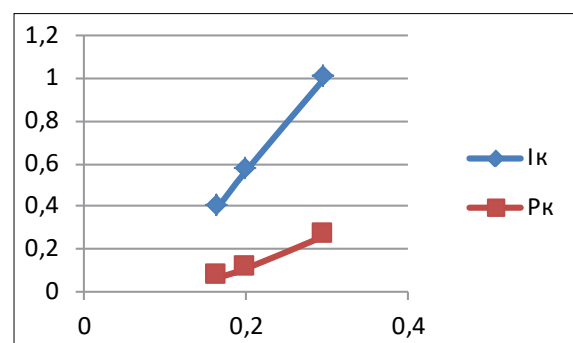


Рис. 7. Характеристика короткого замикання

Таблиця 2

Параметри ХХ АД у відносних одиницях

І в.о.	Р в.о.	U в.о.
0,128571	0,086545	0,277273
0,142857	0,103273	0,331818
0,171429	0,118545	0,418182
0,2	0,157091	0,509091
0,285714	0,243636	0,713636
0,5	0,436364	1

Таблиця 3

Дані характеристики короткого замикання

КЗ	U	P0	I
170	65	72	0,809249
250	44	30,6	0,462428
300	36	18	0,317919

Таблиця 4

Значення ХКЗ у відносних одиницях

Іво	Рво	Uво
1	0,261818	0,295455
0,571429	0,111273	0,2
0,392857	0,065455	0,163636

Наступним режимом був режим робочого ходу у разі зміни напруги живлення двигуна.

Таблиця 5

Значення даних робочого ходу

I	P1	U	I	n
Двигун	–	Генератор	Генератор	Двигун
0,80924855	378	29	6,3	1427
0,66473988	216	34	4,4	1448
0,57803468	126	37	2,75	1459
0,52023121	61,6	40	1	1472
0,40462428	15,4	0	0	1480

Після зняття значень робочих характеристик, щоб побудувати їх, потрібно знайти параметри із використанням паспортних даних двигуна.

Таблиця 6

Шукані параметри двигуна

Рел	Рг	P1-Pг=ΣP	ΣPд	P2д
0,196465	182,7	195,3	97,65	280,35
0,132564	149,6	66,4	33,2	182,8
0,100237	101,75	24,25	12,125	113,875
0,081192	40	21,6	10,8	50,8
0,049116	0	15,4	7,7	7,7
cosφ	η	Мдв	n	s
0,707727	0,741667	1,8762	0,9513	0,0486
0,492332	0,846296	1,2056	0,9653	0,0346
0,330273	0,90377	0,7453	0,9726	0,0273
0,179407	0,824675	0,3295	0,9813	0,0186
0,057667	0,5	0,0496	0,9866	0,0133

Представимо результати розрахунків у вигляді графіків для більш чіткого розуміння процесу.

Струм холостого ходу електродвигуна невеликий і момент обертання, створюваний ним, дорівнює майже нулю. Це ми чітко бачимо з графіків.

Частота обертання в режимі холостого ходу майже дорівнює синхронній швидкості обертання. За навантаження асинхронного електродвигуна частота обертання падає, а ковзання зростає. Оскільки зростають ЕРС в обмотці ротора, то посилюється струм ротора і росте обертаючий момент. Через невеликий проміжок часу знову відновлюється стан рівноваги між навантажувальним моментом і моментом, що обертає за певної, більш низької частоти обертання.

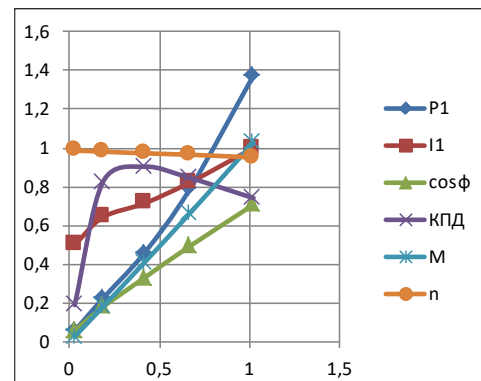


Рис. 8. Робочі характеристики двигуна потужністю 0,275 кВт

Залежність $M_2=f(P_2)$ криволінійна, позаяк з ростом навантаження P_2 частота обертання n_2 дещо зменшується.

Залежність струму $I_1=f(P_2)$ являє собою характеристику, близьку до прямої. Це свідчить про те, що з підвищенням навантаження струм I_1 збільшується практично пропорційно щодо корисної потужності. Ця залежність виходить не з початку координат, оскільки двигун у режимі холостого ходу ($P_2=0$) використовує з мережі струм холостого ходу I_0 , величина якого у асинхронних двигунів більша, ніж у трансформаторів. Останнє пояснюється наявністю механічних втрат і повітряного проміжку на шляху магнітного потоку двигуна. Струм холостого ходу в асинхронних двигунах може досягати 20–30% від номінального струму $I_{ном}$.

Залежність $\cos\phi_1=f(P_2)$ показує: за малих навантажень ϕ_1 має низькі значення (0,2 0,3). Зі збільшенням навантаження коефіцієнт потужності збільшується, досягаючи максимуму (0,75 0,85) за навантаження, близького до номінального. Останнє пояснюється тим, що за будь-якого навантаження двигуна, включаючи режим холостого ходу, двигун використовує з мережі намагнічуючий (реактивний)

струм приблизно однакової величини. Тому в режимі холостого ходу і за невеликих навантажень використовується з мережі струм має значний реактивний складник, що і є причиною низького значення $\cos\phi$. З підвищенням навантаження збільшується активний складник струму I , коефіцієнт потужності підвищується. У разі перевантажень, що відповідають малим частотам обертання, $\cos\phi$ зменшується, що пояснюється збільшенням індуктивного опору обмотки ротора за збільшення ковзання.

З цього можна зробити висновки, що характеристики, які зняти з нашого досліджуваного двигуна, є дуже схожими до вигляду стандартних характеристик асинхронних двигунів, що використовуються у виробництві та у лабораторних стендах кафедри електромеханіки. Це означає, що монтаж, побудова та підключення всіх елементів двигуна були зроблені правильно. Отже, цей стенд можна використовувати як стенд для проведення лабораторних робіт та зняття основних характеристик асинхронних двигунів у майбутньому.

Висновки. Розроблено експериментальний стенд для дослідження асинхронного двигуна із короткозамкненим ротором для дослідницьких та навчальних потреб.



Рис. 9. Готовий стенд для дослідження АД з КЗ-обмотко

Розроблений стенд дає змогу зняття робочих характеристик асинхронного двигуна в трифазному режимі; зняття характеристик холостого ходу асинхронного двигуна в трифазному режимі; зняття характеристик короткого замикання асинхронного двигуна в трифазному режимі.

Використання стенду дає змогу модернізувати лабораторне обладнання навчального закладу та підвищити якість підготовки фахівців напряму «Електромеханіка».

Список літератури:

1. Низкогуз П.В. Експериментальний стенд для дослідження асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором. Комплексна робота. Ч.2. Дипломна робота. К.: НТУУ «КПІ», 2016 р. 56 с.
2. Кравчик А.Э. Асинхронные двигатели серии 4А. Справочник. М.: Энергоиздат, 1982 г. 504 с.
3. URL: <http://electricalschool.info/econom/721-chastotnyjj-preobrazovatel-dlja.html>

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

Стенд выступает обновлением материально-технической базы лаборатории и помогает будущим и нынешним студентам работать и получать знания на более современном уровне; расширяет представления о теории электрических машин и электротехники. Функциональные возможности стенда заключаются в возможности снятия характеристик ЭМД и, кроме этого, такие стенды позволяют измерить сопротивление изоляции обмоток относительно корпуса и между фазами обмоток; провести испытания изоляции обмоток относительно корпуса на электрическую прочность; сделать измерения сопротивления обмоток постоянному току в практически холодном состоянии; осуществить испытания межвитковой изоляции и определение коэффициента трансформации.

Ключевые слова: асинхронный двигатель с КЗ ротором, короткозамкнутый ротор, лабораторный стенд, характеристики АД.

EXPERIMENTAL STAND FOR THE INVESTIGATION OF AN INDUCTION MOTOR WITH A SQUIRREL-CAGE ROTOR

The stand is an update of the material and technical base of the laboratory and helps future and current students to work and receive knowledge at a more modern level and broadens their understanding of the theory of electrical machines and electrical engineering. The functionality of the stand consists in the possibility of removing the EMFE characteristics and in addition, such stands allow measuring the insulation resistance of the windings relative to the housing and between phases of the windings; to test the insulation of the windings with respect to the housing for electrical strength; make DC winding resistance measurements in a practically cold state; carry out tests of interturn isolation and determination of the coefficient of transformation.

Key words: asynchronous motor with squirrel-cage rotor, short-circuited rotor, laboratory stand, characteristics of asynchronous motor.

РАДІОТЕХНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

УДК 621.396.946

Лисенко О.І.

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

Новіков В.І.

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

Петрова В.М.

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

Гуйда О.Г.

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

ПРОЦЕДУРА СИНТЕЗУ ТОПОЛОГІЇ БЕЗПРОВІДНОЇ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ МОНІТОРИНГУ ЦІЛЕЙ ІЗ МІНІМІЗАЦІЄЮ ЗАГАЛЬНОЇ ПОТУЖНОСТІ ПЕРЕДАЧІ ВУЗЛІВ

Запропоновано нову математичну модель процедури побудови енергозберігаючої топології безпроводної сенсорної мережі моніторингу цілей шляхом управління потужністю передачі вузлів БСМ. Для підвищення ефективності функціонування БСМ моніторингу цілей мережевий рівень еталонної моделі OSI пропонується реалізувати на двох підрівнях: на верхньому рівні проводиться оперативне управління топологією мережі; на нижньому – управління побудовою і підтримкою маршрутів в отриманій топології. Основне завдання у разі побудови топології БСМ полягає в отриманні зв'язної топології та задоволенні показників якості обслуговування потоків даних за мінімізації загальної потужності передачі вузлів у сенсорній мережі.

Ключові слова: безпроводна сенсорна мережа, управління топологією, управління потужністю передачі.

Вступ. Електроживлення вузлів безпроводних сенсорних мереж (БСМ) здебільшого здійснюється від батарей. У зв'язку з цим у системі управління БСМ виділена підсистема управління витратами енергоресурсу вузлів [1]. Метою її функціонування є мінімізація та перерозподіл витрат енергоресурсу вузлами для максимізації тривалості функціонування БСМ. Наявні методи управління витратами енергоресурсів БСМ не враховують особливостей БСМ і тому не забезпечують максимізацію тривалості їх функціонування за виконання вимог до якості інформаційного обміну. У зв'язку з цим задача розробки нових та удосконалення наявних методів управління витратами енергоресурсів для використання в БСМ є актуальною на сучасному етапі розвитку безпроводних телекомунікацій.

Основна частина. Управління витратами енергоресурсу вузлів БСМ може бути реалізоване за рівнями еталонної моделі OSI із використанням різних методів, які в загальному випадку можна поділити на дві групи: методи збереження енергії батарей і методи управління потужністю передачі. У роботі [2] було запропоновано новий енергозберігаючий метод моніторингу цілей у зонах спостереження сенсорів БСМ, який відноситься до першої групи методів і складається з трьох етапів:

1. Знаходження верхньої межі максимальної тривалості функціонування сенсорної мережі $T_{\Phi_{БСМ}}$ та матриці спостереження $|T|_{n \times m}$ (яка визначає інтервал часу, протягом якого сенсори спостерігають за цілями у зонах спостереження).

2. Визначення сесій спостереження – розбиття матриці спостереження $|T|_{n \times m}$ на послідовність

матриць (сесій) спостереження $T_{n,m} = T_1 + T_2 + \dots + T_t$, які не зменшують отримане значення максимальної тривалості функціонування сенсорної мережі та забезпечують виконання умови: один сенсор – одна ціль.

3. Визначення маршрутів передачі зібраної інформації за сесіями спостереження.

Для підвищення ефективності енергозберігаючого методу моніторингу цілей пропонується використати в ньому нову енергозберігаючу процедуру побудови топології мережі шляхом управління потужністю передачі вузлів БСМ. Під топологією мережі розуміють сукупність вузлів на місцевості і каналів, що сполучають їх, у взаємному розташуванні. Топологія визначає потенційні можливості мережі з доставки даних між взаємодіючими вузлами. Передбачається, що кожен вузол може змінювати потужність передачі $p_i = [p_{i,\min} \dots p_{i,\max}]$ з певним кроком дискретизації Δ_p .

Відповідно, під управлінням топологією БСМ розумітимемо управління U_T , що змінює топологію БСМ у процесі її функціонування за рахунок перерозподілу потужностей передач вузлів p_i з метою забезпечення цільової функції Z_k , $k = \overline{1, K}$ [1, 2]:

Z_1 – мінімізація потужностей передачі вузлів ($\min p_i$) і загальної потужності сенсорної мережі $P_{\text{заг}}$ у цілому.

Z_2 – забезпечення зв'язності мережі (зв'язності між вузлами i та $u - cv_{iu} = 1$);

Z_3 – мінімізації часу затримки передачі повідомлень ($\min \bar{t}_3$);

Z_4 – максимізації пропускної спроможності мережі ($\max S$);

Для підвищення ефективності функціонування БСМ моніторингу цілей мережевий рівень еталонної моделі OSI (як складову частину системи управління) пропонується реалізувати на двох підрівнях: на верхньому рівні проводиться оперативне управління топологією мережі (створюються потенційні маршрути передачі інформації); на нижньому – управління побудовою і підтримкою маршрутів у отриманій топології (реалізується конкретний метод маршрутизації) [3].

Верхній і нижній рівні працюють у різних часових інтервалах. Цикл управління маршрутами значно менший за цикл управління топологією. Співвідношення циклів управління мусить бути таким, що на кожному кроці топологічних змін має відбуватися весь цикл управління маршрутами. Тільки в цьому разі можливе досягнення ефективності реалізованої топології.

Розглянемо математичну модель процедури побудови топології БСМ моніторингу цілей.

БСМ уявляється у вигляді графа $G = (V, E)$ з множиною вершин $V = \{i\}$ і множиною ребер $E = \{(i, j) | p_{iu} \approx (d_{iu})^{-\alpha}\}$, що визначають матрицю зв'язності $CV = \|cv_{iu}\|$, де $cv_{iu} = \{0, 1\}$ – булева змінна, d_{iu} – відстань між вузлами i та u для $i \uparrow u$, $i = \overline{1, N}$, $u = \overline{1, N}$, p_{iu} – потужність передачі вузла i , яка необхідна для забезпечення радіозв'язності з вузлом u , $0 < p_{iu} < p_{\text{пор}}$ для $0 < i < n$, α – параметр, що приймає значення між 2 та 4. $P(CV) = \sum_{i=1}^n p_i$ – загальна потужність передачі сенсорної мережі, що витрачається.

Параметри БСМ моніторингу цілей такі: кількість вузлів N ; кожен вузол графа i у момент t описується сукупністю параметрів: координати розташування (x_i, y_i) ; потужність передачі p_i ; ємність батареї E_i^{ξ} ; маршрутна таблиця найкоротших шляхів $\Pi_i = \|\eta(\pi_{iu}^{(b)})\|$, де $b \in D$, $(i, u) \in E$, $\pi_{iu}^{(b)} = \{0, 1\}$ – маршрутна змінна, що визначає відсутність (наявність) маршруту від відправника i до адресата b через сусідній вузол $u \in N_i$, l_{η} – довжина найкоротшого маршруту, $\eta = \overline{1, N}$ – позитивні метрики (наявність радіозв'язності – η_1 , енергія батарей вузлів – η_2 , потужність передачі вузлів – η_3 , відстань – η_4 , затримка передачі – η_5 , пропускна спроможність – η_6). Інтенсивність вхідних потоків визначається матрицею тягіння $Q^{\xi} = \|Q_{ab}^{\xi}\|$, $\sum_{a=1}^N \sum_{b=1}^N q_{ab}^{\xi} \leq q_{\max}^{\xi}$, де $a \in S$ – відправник; $b \in D$ – базова станція; $q_{iu}^{\xi} \leq s_{\max}$ – пропускна спроможність радіоканалу $\forall (i, u) \in E$; радіозв'язність між вузлами мережі підтримується одним із детермінованих протоколів каналного рівня.

Множина вимог до процедури побудови топології $\{Bq\}$, $q = \overline{1, 4}$ така: мінімізація потужностей передач вузлів і загальної потужності сенсорної мережі у цілому; забезпечення зв'язності мережі; мінімізація часу затримки передачі повідомлень; максимізація пропускної спроможності мережі.

Необхідно у режимі реального часу знайти матрицю зв'язності CV^* (визначити потужність передачі p_i для кожного вузла $i - 0 \leq i \leq N$, що забезпечує виконання цільової функції Z_k , $k = \overline{1, K}$):

$$C_k^* = \arg_{U_T \in \Omega_T} \text{opt } Z_k(CV) \quad (1)$$

за виконання обмежень на множину управляючих впливів і ресурси мережі Ω_T

$$\Omega_T : \left\{ \begin{array}{l} t_3^{\xi}(m_{ab}) \leq t_{\text{доп}}^{\xi} (l_{ab}^{\xi}(m_{ab}) \leq l_{\text{доп}}^{\xi}), \\ q_{iu}^{\xi} \leq s_{\text{доп}}(cv_{iu}), \\ p_i \leq p_{\text{пор}}, \\ E_i^{\xi} \leq E_{i\max}^{\xi}, \text{ для } i \in C - D \end{array} \right. \quad (2)$$

де t_3^{ξ} – затримка передачі трафіка ξ -го типу, q_{iu}^{ξ} – інтенсивність потоків пакетів, що надхо-

дять за всіма маршрутами m_{ab} , які проходять через цей вузол $i - q_{iu}^{\xi} = \sum_{a=1}^N \sum_{b=1}^N \gamma_{ab}$; $(i, u) \in m_{ab}$ – маршрут з відправником у вузлі a і одержувачем b ; $a, b, i, u \in V$, p_i – потужність передачі i -го вузла відповідно до прийнятих маршрутних рішень P_i ; $s(cv_{iu})$ – пропускна спроможність радіоканалу; l_{ab}^{ξ} – кількість ретрансляцій для пари вузлів (a, b) повідомлень за маршрутом m_{ab} ; $p(m_{ab}) = \sum_{(i,u) \in m_{ab}} (k_1 d_{ij}^{\pm} + k_2)$, $a = 2 \dots 4$, k_1 і k_2 – константи; $p_{\text{пор}}$, $t_{\text{злпн}}$, $l_{\text{доп}}$ – допустимі значення вищезазначених параметрів.

Основне завдання у побудові топології БСМ полягає в отриманні зв'язної топології та задоволенні показників якості обслуговування потоків даних за мінімізації загальної потужності передачі вузлів у сенсорній мережі.

У цьому разі цільова функція виглядає так:

$$CV^* = \|cv_{iu}^*\| = \arg \min_{U_T \in \Omega_T} P(CV) = \arg \min_{U_T \in \Omega_T} \sum_{m=1}^M \sum_{a=1}^N \sum_{b=1}^N p(m_{ab}(CV)) \quad (3)$$

де $P(CV)$ – загальна потужність передачі вузлів сенсорної мережі; $a, b, i, u \in V$; за виконання обмежень (2).

Висновки.

1. Завдання пошуку матриці зв'язності CV^* (1) відноситься до класу NP-повних. Застосування для його вирішення класичних методів приводить до експоненціальної складності. Отримання точного рішення для мережі, яка налічує десятки (сотні) вузлів, пов'язане зі значними часовими витратами. Тому для скорочення перебору топо-

логії в подальших дослідженнях планується розробити множину правил, об'єднаних у базу знань, що змінюють зв'язність мережі для поліпшення її параметрів [4]. Це дає змогу отримати в реальному масштабі часу близькі до оптимальних рішення і використовувати методику для побудови топології БСМ моніторингу цілей. Критерієм визначення моменту перебудови топології мережі є невиконання однієї з умов обмеження Ω_T .

2. Жоден сенсор не може забезпечити повне покриття всіх цілей на всіх дистанціях. Доцільно застосовувати багаторівневий підхід, тобто одночасне розгортання кількох різних типів повністю взаємопов'язаних сенсорів з метою отримання якомога більшого обсягу інформації (мультисенсорну мережу).

Поєднання декількох сенсорів в одному вузлі (акустичні, оптико-електронні, інфрачервоні, сейсмічні, магнітні детектори тощо) дає змогу виявляти повітряні і наземні цілі. Систему, яка може відстежувати людей і машини через акустичні і сейсмічні датчики, можна поєднати з оптико-електронною системою, яка спрямовуватиметься на об'єкт, виявлений радаром. У свою чергу радар можна приєднувати до супутників засобами зв'язку дальньої дії для передачі даних іншим користувачам.

Мультисенсорні мережі потребують багаторазового застосування процедури енергозберігаючої оптимізації, що враховує особливості функціонування кожного сенсора зі складу мультисенсорного блока. Узгоджена енергозберігаюча оптимізація мультисенсорної мережі є перспективою подальших досліджень.

Список літератури:

1. Лисенко О.І. Функціональна модель системи управління безпроводною сенсорною мережею із самоорганізацією для моніторингу параметрів навколишнього середовища / О.І. Лисенко, К.С. Козелкова, В.І. Новіков, Т.О. Прищепа, А.В. Романюк. Системи обробки інформації. 2015. Вип. 10. С. 222–225.
2. Новіков В.І. Метод збільшення часу життя безпроводної сенсорної мережі з надлишковою кількістю вузлів під час стеження за цілями моніторингу. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2017. Том 28 (67) № 2 С. 38–43.
3. Романюк В.А. Активная маршрутизация в мобильных радиосетях. Зв'язок. № 3. 2002. С. 21–25.
4. Романюк В.А. Підходи до розробки нової архітектури системи управління неоднорідними безпроводними сенсорними мережами / В.А. Романюк, О.І. Лисенко, І.В. Алексеєва, А.В. Романюк, В.І. Новіков. Математичні машини і системи, 2017, № 2. С. 15–23.

ПРОЦЕДУРА СИНТЕЗА ТОПОЛОГІИ БЕСПРОВОДНОЙ СЕНСОРНОЙ СЕТИ МОНИТОРИНГА ЦЕЛЕЙ С МИНИМИЗАЦИЕЙ ОБЩЕЙ МОЩНОСТИ ПЕРЕДАЧИ УЗЛОВ

Предложена новая математическая модель процедуры построения энергосберегающей топологии беспроводной сенсорной сети мониторинга целей путем управления мощностью передачи узлов БСМ. Для повышения эффективности функционирования БСМ мониторинга целей сетевой уровень эталонной модели OSI предлагается реализовать на двух подуровнях: на верхнем уровне проводится оперативное управление топологией сети; на нижнем – управление построением и поддержкой маршрутов

при полученной топологии. Основная задача при построении топологии БСМ состоит в получении связной топологии и удовлетворении показателей качества обслуживания потоков данных при минимизации общей мощности передачи узлов в сенсорной сети.

Ключевые слова: *беспроводная сенсорная сеть, управление топологией, управление мощностью передачи.*

PROCEDURE FOR FORMATION THE ENERGY-SAVING LAYOUT TOPOLOGY OF THE WIRELESS SENSOR CIRCUIT MONITORING OF THE TARGETS

It is proposed a new mathematical model of procedure for formation the energy-saving layout topology of the wireless sensor network (WSN) monitoring of the targets. Construction of network topology is carried out by controlling the transmission power of nodes WSN. To improve the effectiveness of the operation of the WSN for monitoring purposes, the network level of the reference model OSI proposed to be implemented on two sublevels: at the upper level is carried out operational management of the network topology, on the bottom – management of the construction and support of routes in the received topology. The main task in constructing topology WSN is to obtain a coherent topology and satisfaction of service quality indicators for data flows while minimizing the total transmitting power of nodes in the sensor network.

Key words: *wireless sensor network, topology control, transmission power control.*

ІНФОРМАТИКА, ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ

УДК 681.51

Андрощук Г.В.

Одеський національний політехнічний університет

Пелих С.Н.

Одеський національний політехнічний університет

РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ АВТОМАТИЧНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ВЛАСТИВОСТЯМИ ЯДЕРНОГО ПАЛИВА ВВЕР-1000 ДЛЯ ПРОГРАМИ РЕГУЛЮВАННЯ ПОТУЖНОСТІ РЕАКТОРА З ПОСТІЙНОЮ СЕРЕДНЬОЮ ТЕМПЕРАТУРОЮ ТЕПЛОНОСІЯ

Нині всі українські АЕС із ВВЕР-1000 експлуатуються в режимі стабілізації потужності енергоблоку на заданому рівні, хоча обладнання 1-го контуру розраховане на експлуатацію в режимі маневрування потужністю. Це, насамперед, пов'язано з тим, що нині маневрування потужністю реакторної установки (РУ) здійснюється операторами в ручному режимі і тільки на вимогу диспетчерів енергосистеми. Виконання маневру операторами РУ в ручному режимі дуже небезпечно, бо під час управління необхідно одночасно контролювати зміну багатьох нейтронно-фізичних і технологічних параметрів, що призводить до необхідності враховувати вплив людського фактору на безпеку АЕС. Рішенням цього завдання може стати створення АСП потужності енергоблоку, яка дасть змогу експлуатувати енергоблок у режимі маневрування потужністю з вимогою, щоб надійність і безпека енергоблоку були знижені, а також щоб економічна ефективність енергоблоку зберігалася на необхідному рівні.

***Ключові слова:** автоматизована система регулювання, реактор ВВЕР-1000, автоматизація, ядерне паливо, середня температура теплоносія.*

Постановка проблеми. Оскільки всі українські АЕС із ВВЕР-1000 експлуатуються в режимі стабілізації потужності енергоблоку на заданому рівні, обладнання 1-го контуру розраховане на експлуатацію в режимі маневрування потужністю. Це, насамперед, пов'язано з тим, що нині маневрування потужністю реакторної установки (РУ) здійснюється операторами в ручному режимі і тільки на вимогу диспетчерів енергосистеми. Виконання маневру операторами РУ в ручному режимі дуже небезпечно, адже при управлінні необхідно одночасно контролювати зміну багатьох нейтронно-фізичних і технологічних параметрів, що призводить до необхідності враховувати вплив людського фактору на безпеку АЕС.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Авторами С.М. Пелих, М.О. Фролов, А.В. Наливайко, Хуйю Чжоу опублікована стаття на тему «Автоматизована система керування властивостями ядерного палива ВВЕР-1000 з урахуванням параметра пошкодження оболонок твелів» [2, с. 1].

Запропоновано автоматизовану систему управління властивостями ядерного палива (ЯП) реактора ВВЕР-1000 з урахуванням параметра деформаційного пошкодження оболонок твелів, глибини вигорання ЯП і аксіального офсету [2, с. 3].

У цій публікації запропоновані склад і структура автоматизованої системи управління властивостями палива реактора ВВЕР-1000, що забезпечує баланс між безпекою та економічністю експлуатації ЯП.

Проте нині залишається невирішеним питання експериментів таких систем та теорій на реальних об'єктах. Відсутні адекватні методи визначення максимальної ефективності методик та їхньої оцінки.

Постановка завдання. З метою розробки та дослідження автоматизованої системи регулювання потужності енергоблоку з постійною середньою температурою теплоносія, яка дасть змогу експлуатувати енергоблок у маневрених режимах добового циклу для підтримки балансу потужності в енергосистемі України, необхідно:

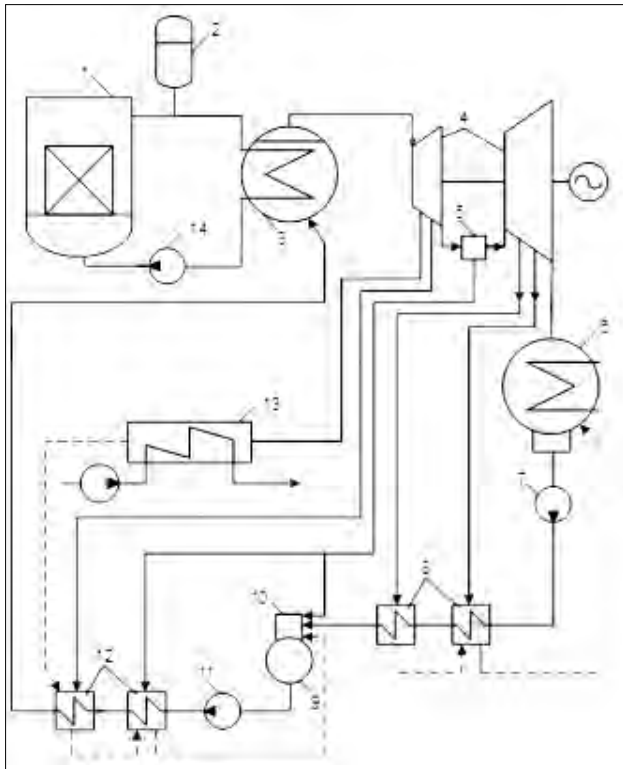


Рис. 1. Спрощена теплова схема енергоблоку АЕС з реактором ВВЕР-1000:

- 1 – реактор; 2 – компенсатор об'єму;
- 3 – парогенератор; 4 – парова турбіна;
- 5 – турбінний сепаратор; 6 – конденсатор;
- 7 – конденсаторний насос; 8 – підігрівачі низького тиску; 9 – деаераторний бак; 10 – деаераторна колонка; 11 – живильний насос; 12 – підігрівачі високого тиску; 13 – мережевий підігрівач;
- 14 – циркуляційний насос

– розробити математичну модель енергоблоку як об'єкта управління, яка складається з багатозонної моделі реактора, моделей парогенератора і турбогенератора;

– моделювання та реалізація на розробленій моделі автоматизовану систему регулювання потужності енергоблоку, яка функціонує за методом регулювання з постійною середньою температурою теплоносія 1-го контуру.

Виклад основного матеріалу дослідження. Енергоблок із реактором ВВЕР-1000 – самостійна частина атомної електростанції, яка являє собою технологічний комплекс для виробництва електроенергії шляхом використання енергії, виділеної при контрольованій ядерній реакції. Енергоблок працює на енергосистему з великою кількістю споживачів електроенергії.

Динамічні процеси в генераторі практично безінерційні, тому електрична потужність, що віддається в енергосистему, дорівнює механічній енергії на роторі турбіни. Основне завдання регу-

лювання енергосистеми полягає в тому, щоб виробляти вироблення електроенергії в точній відповідності до безперервно мінливого споживання [1, с. 160].

На рисунку 1 зображена спрощена теплова схема АЕС із реактором ВВЕР-1000.

Ціллю роботи є розробка АСУ у режимі Н, що мається на увазі автоматичне підтримання нейтронної потужності реактора.

Потужність реактора має відповідати заданому значенню, коефіцієнт розмноження має дорівнювати одиниці, а реактивність – нулю. Однак при експлуатації реактора коефіцієнт розмноження змінюється через вигорання палива, отруєння, шлакування, дію температурного і потужностного ефектів.

Для підтримки реакторів у критичному стані необхідно змінювати властивості активної зони з метою компенсації зазначених ефектів. Вплив на реактивність принципово можливий такими способами:

- збільшенням або зменшенням кількості матеріалу, що ділиться в активній зоні;

- зміною величини витoku нейтронів з активної зони;

- зміною величини поглинання нейтронів.

Найбільшого поширення набув спосіб зміни реактивності шляхом зміни величини поглинання нейтронів. При цьому можливі такі способи:

- регулювання рухливими твердими поглиначами нейтронів;

- рідинне регулювання, коли змінюється рівень або щільність рідкого поглинача у спеціальних каналах;

- газове регулювання, коли змінюється висота поглинаючого стовпа газу, або його концентрація, або щільність;

- хімічне регулювання, коли змінюється концентрація поглинача в теплоносії;

- компенсація реактивності рухливими вигоряючими поглиначами. Такий поглинач завантажується разом з ядерним паливом і постійно вигоряє. При цьому компенсується реактивність шляхом вигорання і зашлакування палива.

Незважаючи на велику кількість способів управління реактивністю, регулювання реакторами здійснюється твердими поглиначами (з додатковим застосуванням хімічної регулювання в ВВЕР).

Оскільки СУЗ реакторів служить для компенсації реактивності, регулювання потужності і захисту, розрізняють такі органи регулювання:

- компенсуючі стрижні;

- регулюючі стрижні;

- стрижні аварійного захисту.

Компенсуючі стрижні (КС) або ручного регулювання (РР) призначені для компенсації великих, але повільних змін реактивності.

Стрижні автоматичного регулювання (АР) призначені для компенсації швидких, але малих змін реактивності.

Стрижні аварійного захисту (АЗ) призначені для швидкого припинення ланцюгової реакції в аварійних випадках. У найбільш небезпечних ситуаціях проводиться скидання стрижнів АЗ в активну зону.

Крива інтегральної ефективності однієї групи органів СУЗ ВВЕР-1000 від глибини занурення в активну зону у відсотках показана на рис. 2. Як видно, в центральній частині характеристика близька до лінійної.

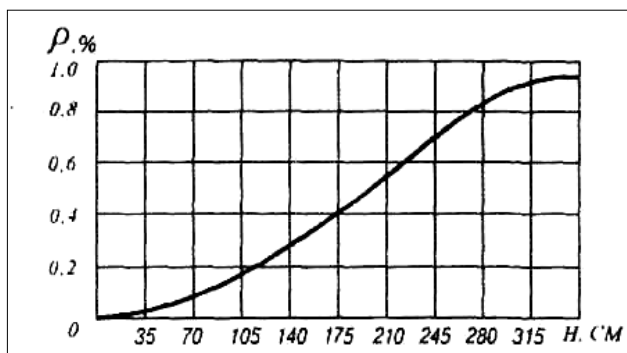


Рис. 2. Інтегральна ефективність однієї групи ОР СУЗ ВВЕР-1000

Схема регулювання потужності енергоблоку з ВВЕР-1000 за програмою з постійною середньою температурою теплоносія зображена на рисунку 3.

Для зрозуміння, як саме функціонує програма регулювання, далі буде описана її робота.

Персонал енергоблоку для збільшення/зменшення потужності за допомогою задатчика 7 змінює задане значення і при цьому регулятор потужності енергоблоку 8 залежно від сигналу неузгодженості формує управляючу команду, яка передається механізму управління турбіною 9. Механізм управління турбіною 9 за допомогою сервомотора 10 відкриває/закриває регулюючий клапан 3 турбіни 4. Таким чином, електрична потужність генератора буде змінюватись до тих пір, поки сигнал неузгодженості не буде рівним нулю.

У разі відкриття/закривання регулюючого клапану турбіни тиск пари перед турбіною та у парогенераторі 2 зменшиться/збільшиться, що, відповідно, приведе до зменшення/збільшення тиску пари та температури насичення у парогенераторі, тобто кількість тепла, що відводиться другим контуром, збільшиться/зменшиться.

Раніше описані процеси призведуть до того, що температура теплоносія першого контуру на виході з парогенератора зменшиться/збільшиться. Разом із нею зменшиться/збільшиться і середня температура теплоносія.

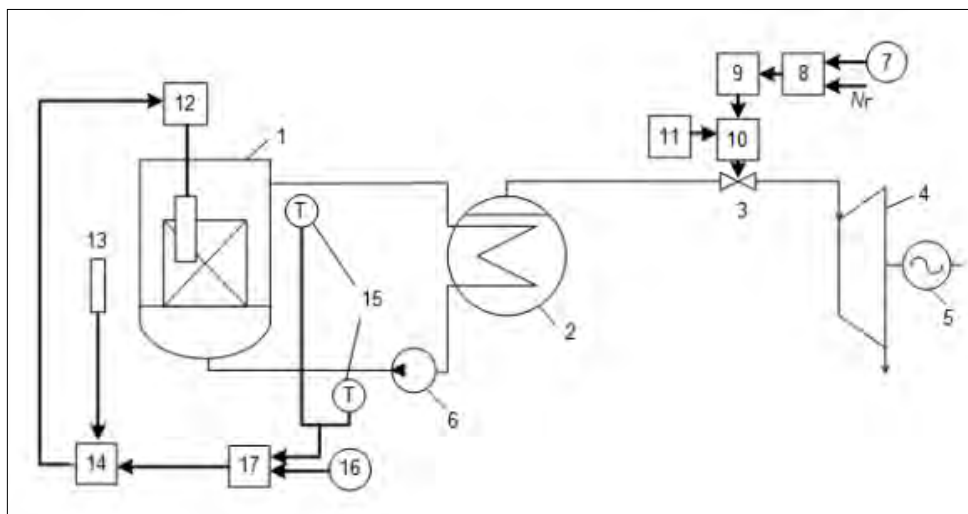


Рис. 3. Принципова схема регулювання потужності енергоблоку з реактором ВВЕР-1000, яка реалізує програму з постійною середньою температурою теплоносія: 1 – реактор; 2 – парогенератор; 3 – регулюючий клапан турбіни; 4 – турбіна; 5 – генератор; 6 – головний циркуляційний насос; 7 – задатчик електричної потужності генератора; 8 – регулятор потужності енергоблоку; 9 – механізм управління турбіною; 10 – сервомотор; 11 – регулятор частоти обертання турбіни; 12 – приводи регулюючих стрижнів; 13 – іонізаційна камера; 14 – регулятор нейтронної потужності реактора; 15 – датчики температури теплоносія першого контуру; 16 – задатчик середньої температури теплоносія першого контуру; 17 – регулятор середньої температури теплоносія першого контуру

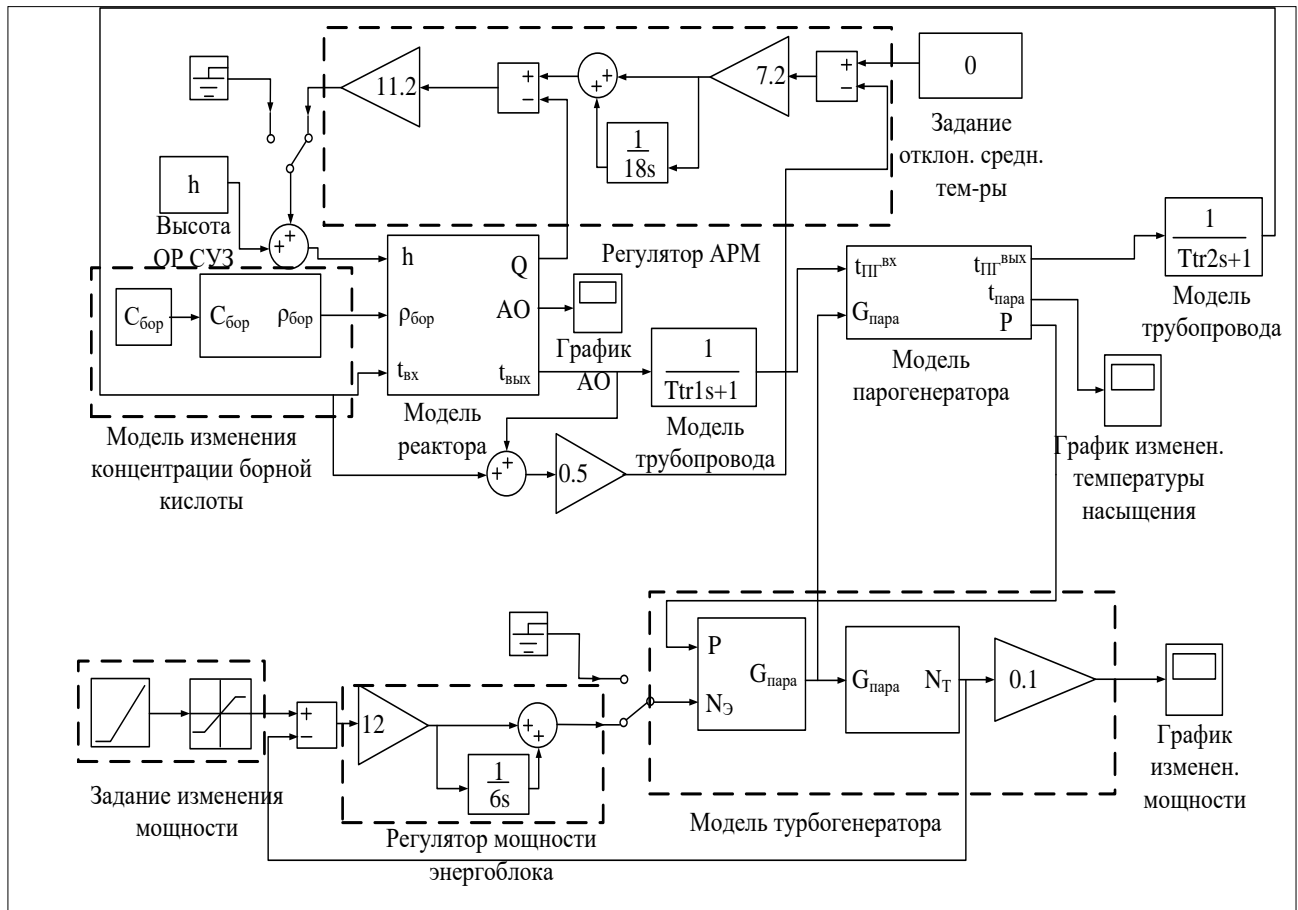


Рис. 4. Моделирование автоматизированной системы регулирования мощности энергоблока

Регулювання нейтронної потужності здійснюється за допомогою автоматичного регулятора потужності (АРП). АРП складається з регулятора середньої температури теплоносія першого контуру 17 та регулятора нейтронної потужності 14. За допомогою датчика 16 та датчиків 15 середньої температури першого контуру формується сигнал неузгодженості, тим самим регулятор середньої температури теплоносія першого контуру випрацьовує коригуючий сигнал на регулятор нейтронної потужності.

Далі регулятор нейтронної потужності змінює положення регулюючих стрижнів 12, що призводить до підтримання постійного значення середньої температури теплоносія першого контуру.

Регулювання електричної потужності энергоблоку здійснюється за допомогою автоматичного регулятора потужності (АРП) і регулятора потужності энергоблоку.

АРМ є каскадом із двох ієрархічно сполучених регуляторів:

1. нейтронної потужності реактора, який є стабілізуючий;
2. середньої температури теплоносія 1-го контуру, який є коригуючим.

Прийнято, що регулятор середньої температури теплоносія 1-го контуру і регулятор потужності энергоблоку мають ПІ-закон регулювання, а регулятор нейтронної потужності реактора, оскільки він є стабілізуючим регулятором, має П-закон регулювання. Розрахунок налаштувань регуляторів здійснювався за методом А.П. Копеловича.

Після налаштування регуляторів на моделі була реалізована програма регулювання з постійною середньою температурою теплоносія. Зміна завдань по електричній потужності з 100 до 80% номінальної потужності відбувалася лінійно, безперервно, з регламентною швидкістю 5 МВт/хв.

Експлуатація реактора в режимах із потужністю энергоблоку менше за 80% економічно недоцільна. Тому в цьому розділі і далі розглядатиметься зміна технологічних параметрів энергоблоку саме в діапазоні від 100 до 80% номінальної потужності энергоблоку.

АСР потужності энергоблоку АЕС з ВВЭР-1000, алгоритм управління якої реалізує програму регулювання з постійною середньою температурою теплоносія в АКЗ реактора в середовищі

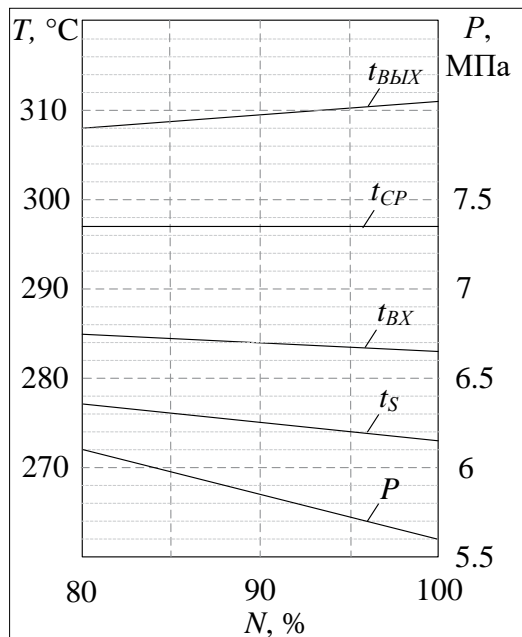


Рис. 5. Зміна технологічних параметрів в залежності від потужності енергоблоку

моделювання Simulink пакету Matlab представлена на рисунку 4.

З метою виведення на графіки абсолютних значень були задані такі початкові умови: номінальне значення середньої температури теплоносія 297 З; номінальне значення температури теплоно-

сія на вході в АКЗ реактора 283°C; номінальний тиск пари в 2-му контурі -5.7 МПа; номінальна температура насичення пари -273°C.

В один графік (рис. 5) були зведені зміни всіх технологічних параметрів залежно від потужності енергоблоку.

Висновки. Проаналізувавши отримані результати, можна зробити висновки, що ця АСУ має низку переваг та недоліків, тому доцільно буде їх перерахувати:

переваги – у маневрових режимах енергоблок працює головним чином при постійній температурі теплоносія у першому контурі, при цьому тиск пари у другому контурі в разі значних відхилень знаходиться у допустимих рамках;

недоліки – на практиці підтримка постійної температури теплоносія у першому контурі при маневруванні заважка при обмеженні дозволеного діапазону зміни тиску у парогенераторі (62–64 бар).

Також, беручи до уваги такі переваги методу регулювання потужності енергоблоку з постійною середньою температурою теплоносія в першому контурі, як найбільш доцільні умови для експлуатації ядерним паливом АСУ властивостями ядерного палива в процесі експлуатації реактору ВВЕР-1000, доцільно та правильно дослідити метод регулювання потужності енергоблоку додатково та на реальному об'єкті.

Список літератури:

1. Пелых С.Н. Основы управления свойствами твэлов ВВЭР. Saarbrücken: Palmarium Academic Publishing, 2013. 160 с.
2. Пелих С.М., Фролов М.О., Наливайко А.В., Хуэйю Чжоу. Автоматизована система керування властивостями ядерного палива ВВЕР-1000 з урахуванням параметра пошкодження оболонок твєлів. Збірник «Наукові праці». Одеса, 2017. С. 1.
3. Овчинников Ф.Я. Эксплуатационные режимы водо-водяных энергетических реакторов. Москва, 1988. 359 с.
4. Соснин О.В. Энергетический вариант теории ползучести. Новосибирск, 1986. – 95 с.

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СВОЙСТВАМИ ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА ВВЭР-1000 ДЛЯ ПРОГРАММЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ МОЩНОСТИ РЕАКТОРА С ПОСТОЯННОЙ СРЕДНЕЙ ТЕМПЕРАТУРОЙ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

Сегодня все украинские АЭС с ВВЭР-1000 эксплуатируются в режиме стабилизации мощности энергоблока на заданном уровне, хотя оборудование 1-го контура рассчитано на эксплуатацию в режиме маневрирования мощностью. Это, прежде всего, связано с тем, что в настоящее время маневрирование мощностью реакторной установки (РУ) осуществляется операторами в ручном режиме и только по требованию диспетчеров энергосистемы. Выполнение маневра операторами РУ в ручном режиме очень опасно, так как при управлении необходимо одновременно контролировать изменение многих нейтронно-физических и технологических параметров, что приводит к необходимости учитывать влияние человеческого фактора на безопасность АЭС. Решением этой задачи может стать создание АСУ мощности энергоблока, которая позволит эксплуатировать энергоблок в режиме маневрирования мощностью с требованием, чтобы надежность и безопасность энергоблока были снижены и чтобы экономическая эффективность энергоблока хранилась на необходимом уровне.

Ключевые слова: автоматизированная система регулирования, реактор ВВЕР-1000, автоматизация, ядерное топливо, средняя температура теплоносителя.

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF THE AUTOMATIC CONTROL SYSTEM OF THE PROPERTIES OF THE NUCLEAR FUEL VVER-1000 FOR THE PROGRAM CONTROL THE POWER OF THE REACTOR WITH A CONSTANT AVERAGE COOLANT TEMPERATURE

Today, all Ukrainian NPPs with VVER-1000 are operated in the mode of stabilizing the power of the power unit at a given level, although the equipment of the 1st circuit is designed for operation in the mode of maneuvering power. This is primarily due to the fact that at present, the maneuvering capacity of the reactor plant (RU) is carried out by operators in manual mode and only at the request of the dispatchers of the power system. Manual maneuvering by RP operators is very dangerous, since during control it is necessary to simultaneously control changes in many neutronic and technological parameters which leads to the need to take into account the human factor's influence on NPP safety. The solution to this problem can be the creation of ASR power unit, which will allow the unit to operate in power maneuvering mode with the requirement that the reliability and safety of the power unit are reduced, as well as the economic efficiency of the unit is kept at the required level.

Key words: automation control system, reactor VVER-1000, automation, nuclear fuel, average constant temperature.

Биряк В.В.

Одесский национальный политехнический университет

НАЗНАЧЕНИЕ ОБОРУДОВАНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И ЗАЩИТЫ. РЕЖИМЫ РАБОТЫ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СИСТЕМ СУЗ. МОДЕЛЬ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕГУЛИРУЮЩЕЙ ГРУППЫ ОГАНОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ СУЗ НА ЗАЭС

Одна из важнейших задач при эксплуатации ядерного реактора – обеспечение ядерной безопасности и управление режимами его работы. Ядерный реактор управляется главным образом с помощью системы управления и защиты (СУЗ), поэтому пуск и работа реактора без системы запрещается. Объектом рассмотрения является оборудование систем управления и защиты, режимы работы таких их функциональных систем: режимы функционирования системы группового и индивидуального управления (СГИУ), электропитание (ЭП) СУЗ; режимы функционирования системы аппаратуры контроля нейтронного потока (АКНП); режимы функционирования системы программно-технического комплекса аварийной защиты – предупредительной защиты (ПТК АЗ-ПЗ). Также представлена модель эффективности регулирующей группы органов регулирования (ОР) СУЗ на примере 5 блока Запорожской АЭС.

Ключевые слова: система управления и защиты, программно-технический комплекс, аварийная защита, предупредительная защита, система группового и индивидуального управления, аппаратура контроля нейтронного потока, АЭС.

Постановка проблемы. Энергетические реакторы предназначены для получения тепла, используемого в дальнейшем для его преобразования в электрическую энергию. Как объект управления, ядерный реактор (ЯР) обладает существенными особенностями по сравнению с другими объектами энергоблока.

Первая особенность обусловлена его нейтронно-физическими свойствами. Это качественная и количественная зависимость динамики поведения реактора от исходной мощности и величины вносимой реактивности, скорости изменения плотности нейтронов. Вторая особенность – изменение мощности подкритического реактора по экспоненциальному закону. Третья особенность – это зависимость коэффициента усиления ядерного реактора от уровня мощности. Для устойчивой работы системы автоматического регулирования необходимо, чтобы коэффициент усиления всей системы (реактор плюс регулятор) в диапазоне регулирования мощности ЯР был постоянным. Четвертая особенность – наличие внутренних обратных связей, обусловленных температурной зависимостью реактивности и отравлением ядерного реактора продуктами деления. Пятая особенность – это необходимость компенсации большого запаса реактивности с помощью выгорающего поглотителя. Шестая особенность – это многорежимность функционирования ядерного реактора. Седьмая особенность – потенци-

альная возможность выделения огромной энергии за чрезвычайно малые промежутки времени. Восьмая особенность – наличие значительной радиоактивности в местах расположения различных элементов систем контроля, регулирования и защиты, что затрудняет эксплуатацию и ремонт оборудования. Длительная работа, например, датчиков (детекторов) этих систем при высоких уровнях излучения может привести к ухудшению характеристик датчиков и изменению электрического сигнала.

Постановка задания. Эти особенности ядерного реактора учитываются при разработке систем управления и защиты. Одна из важнейших задач при эксплуатации ядерного реактора – обеспечение ядерной безопасности и управление режимами его работы. Ядерный реактор управляется главным образом с помощью системы управления и защиты (СУЗ).

Изложение основного материала.

Назначение оборудования СУЗ

Системой управления и защиты ядерного реактора называется многофункциональная подсистема автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУТП) блока, предназначенная для контроля мощности реактора, управления и быстрого гашения цепной реакции во всех режимах его работы, а также поддержания реактора в подкритическом состоянии. Пуск и работа реактора без системы СУЗ запрещаются.

Основным требованием, предъявляемым к СУЗ, является обеспечение безопасности работы АЭС. Для обеспечения этого требования все устройства СУЗ должны обладать высокой надежностью. Кроме того, СУЗ должна обладать высокой живучестью, т.е. обеспечивать выполнение наиболее ответственных функций (гашение цепной реакции) даже при наиболее тяжелых авариях на блоке (полное обесточивание станции, пожары в помещениях блочного щита управления (БЩУ) и кабельных трассах).

При более подробном рассмотрении назначения оборудования СУЗ можно указать, что система управления и защиты реактора предназначена: для автоматического регулирования мощности ЯР в соответствии с мощностью, отдаваемой турбогенераторами в сеть, или стабилизации мощности ЯР на заданном уровне; для пуска ядерного реактора (ЯР) и вывода его на мощность в ручном режиме; для компенсации изменения реактивности в ручном и автоматическом режимах; для аварийной защиты ЯР (прекращения или замедления цепной реакции в активной зоне ядерного реактора); для сигнализации о причинах срабатывания аварийной защиты; для автоматического шунтирования некоторых сигналов аварийной защиты; для сигнализации о неисправностях, возникающих в СУЗ; для индикации положения органов регулирования (ОР) ЯР на БЩУ и резервном щите управления (РЩУ), а также выдачи информации о положении каждого ОР в систему внутривычислительного контроля (СВРК) и управляющую вычислительную систему (УВС) энергоблока.

Система управления и защиты ядерного реактора обеспечивает функции управления и аварийной защиты.

Функции управления заключаются: в пуске реактора с периодом не менее допустимого; в изменении мощности реактора при пуске, остановке, переходе с одного режима на другой; в поддержании требуемой мощности реактора; в автоматическом или ручном регулировании распределения энерговыделения по активной зоне реактора; в регулировании ядерной энергетической установки в режимах нормальной эксплуатации; в ограничении мощности реактора в зависимости от состава основного оборудования, находящегося в работе; в автоматическом или ручном снижении мощности при изменении условий эксплуатации реактора.

Функция защиты заключается в быстром автоматическом и надежном гашении цепной реакции в следующих случаях: при достижении аварийной

уставки по нейтронной мощности; при достижении аварийной уставки по скорости нарастания мощности (или реактивности); при достижении аварийной уставки по технологическому параметру, требующего останова реактора; при исчезновении напряжения на шинах электропитания СУЗ; при появлении аварийных технологических сигналов, требующих останова реактора; при нажатии кнопок АЗ; при неисправности или нерабочем состоянии любых двух из трех каналов защиты по уровню или скорости нарастания мощности.

Аварийная защита должна обладать приоритетом перед другими видами управления.

СУЗ должна обеспечить ручное дистанционное управление любым исполнительным механизмом (ИМ) или группой ИМ.

Режимы работы функциональных систем СУЗ. Режимы функционирования системы АКНП

Режим выхода реакторной установки (РУ) на минимальный контролируемый уровень (МКУ). В этом режиме все блоки детектирования находятся на уровне центра активной зоны, контроль уровня нейтронного потока ведется по сигнально-измерительным каналам, работающим в диапазоне источника. Информация об уровне нейтронного потока в виде гистограммы представлена по всем каналам одновременно на экране дисплея оператора. Ведется контроль мощности по звуковым индикаторам разгона на БЩУ и стрелочным приборам на резервном щите управления (РЩУ). Для АКНП-3 положение блоков детектирования контролируется по сигнальным лампам и показаниям сельсинов на БЩУ и РЩУ.

В режиме дальнейшего подъема мощности РУ, по мере роста мощности, происходит смена диапазонов измерения. Оператор, с помощью переключателей уставок, имеет возможность задавать уставки срабатывания АЗ по мощности РУ, увеличивая их по мере подъема мощности.

Для АКНП-3 по сигналу «начало диапазона» (НД) происходит автоматический вывод блока детектирования (БД) от центра активной зоны в крайнее нижнее положение. Исключение составляет комплект оборудования для РЩУ. Там вывод БД осуществляется по сигналу конца диапазона источника. Такие переходы осуществляются, для основных комплектов, при переходе из диапазона источника (ДИ) в диапазон промежуточный (ДП) и из ДП в диапазон энергетический (ДЭ).

Для АКНП-И, АКНП-ИФ используются БД, которые постоянно находятся в зоне максимального нейтронного потока во всех режимах реакторной установки. Весь диапазон контролируемой

мощности условно разбит на два поддиапазона – пусковой и рабочий. Кроме того, рабочий диапазон разбит еще на два поддиапазона – логарифмический (ДР1) и линейный (ДР2).

Режим работы энергоблока в диапазоне энергетическом (АКНП-3), ДР (ПТК АКНП-И, ПТК АКНП-ИФ) измерения мощности.

В этом режиме оборудование АКНП, кроме сигналов, предназначенных для ввода в действие АЗ, ПЗ и текущего значения мощности РУ, выдает в систему АЗ сигнал о превышении мощности 5% $N_{ном}$ и 75% $N_{ном}$ для ввода или вывода отдельных защит РУ. В систему ускоренной предупредительной защиты (УПЗ) такой сигнал поступает при достижении мощности 75% $N_{ном}$ для ввода УПЗ в работу.

Режим работы оборудования системы контроля положения (СКП)-АКНП

В этом режиме для АКНП-3 предварительно производится установка измерительных камер в шахту реактора. Технологические операции по перегрузке топлива производятся только при разрешающем сигнале на табло устройство визуальное (УВИЗ-06). Для АКНП-И, АКНП-ИФ в этом режиме контроль реактора при загрузке (перегрузке) топлива осуществляется БД (каналами) СКП. Информация при перегрузке (загрузке) топлива выводится на оптико-акустические сигнализаторы и устройства отображения, расположенные на пульте перегрузочной машины и на панелях БЩУ. Работа АКНП в режиме нормальной эксплуатации включает в себя работу двух комплектов АКНП. Критерием успеха системы АКНП при формировании сигналов АЗ является выдача управляющих команд аварийных защит двумя из трех каналов одного из комплектов АКНП. Сигнал по нейтронной мощности в каждый из каналов панели автоматического регулятора мощности (АРМ) и панели разгрузки и ограничения мощности (РОМ) формируется как сумма сигналов от двух устройств накопления и обработки информации (УНО) АКНП (по одному в каждом комплекте). Так как для успешной работы АРМ и РОМ достаточно исправности двух из трех каналов, критерием успеха системы при формировании сигналов по нейтронной мощности в схемы АРМ и РОМ является работа двух из трех пар измерительных каналов: 1УНО и 4УНО, 2УНО и 5УНО, 3УНО и 6УНО.

Режимы функционирования системы ПТК АЗ-ПЗ

Система ПТК АЗ-ПЗ эксплуатируется при нормальных условиях эксплуатации, при нарушениях нормальных условий эксплуатации и при авариях.

В нормальных условиях эксплуатации система ПТК АЗ-ПЗ эксплуатируется в режиме ожидания

при пуске, останове РУ и при работе на мощности. Система находится в состоянии готовности к выполнению своих функций в любой момент времени. Это обеспечивается следующими мерами: обеспечением бесперебойного энергоснабжения системы; положение органов регулирования в верхнем положении (кроме регулирующей группы); все необходимые элементы и устройства проверены и находятся в необходимом положении.

Регулирующее устройство АРМ-5С может работать в режимах: режим «Н» – режим астатического поддержания нейтронной мощности с зоной нечувствительности $\pm 2\%$ $N_{ном}$. Режим реализуется в канале регулятора реактора по нейтронной мощности (РН); режим «Т» – режим астатического поддержания давления во втором контуре с зоной нечувствительности $\pm 2\%$ $N_{ном}$. Режим реализуется в канале регулятора реактора по нейтронной мощности (РН); режим «Т» – режим астатического поддержания давления во втором контуре с зоной нечувствительности $\pm 0,5$ кгс/см². Режим реализуется в канале регулятор реактора по теплотехническому параметру (РТТ); режим «С» – стерегущий режим поддержания давления во втором контуре с зоной нечувствительности $+1,0$ кгс/см². Режим реализуется в канале РРТ.

Регулирующее устройство ПТК АРМ-РОМ-УПЗ может работать в режимах: режим «Н» – режим астатического поддержания нейтронной мощности с зоной нечувствительности $\pm 1,5\%$ $N_{ном}$, от текущего значения; режим «Т» – режим астатического поддержания давления во втором контуре с зоной нечувствительности $\pm 0,5$ кгс/см²; режим «С» – стерегущий режим поддержания давления во втором контуре с зоной нечувствительности $+2,0$ кгс/см².

При нарушениях нормальных условий эксплуатации, когда инициируется аварийный сигнал для остановки реактора, все привода СУЗ теряют электропитание, что приводит к падению всех ОР СУЗ под действием собственного веса до крайнего нижнего положения. У оператора имеется возможность включить систему АЗ с БЩУ или с РЩУ.

При нарушениях нормальных условий эксплуатации, когда инициируется сигнал для срабатывания УПЗ, привода ОР СУЗ первой группы теряют электропитание и опускаются вниз под действием собственного веса до крайнего нижнего положения. Доразгрузка до необходимых уровней мощности РУ осуществляется устройством РОМ-2. У оператора имеется возможность включить систему УПЗ с БЩУ при любой мощности РУ.

Критерием успеха срабатывания АЗ, является формирование на выходе хотя бы одного кроссо-

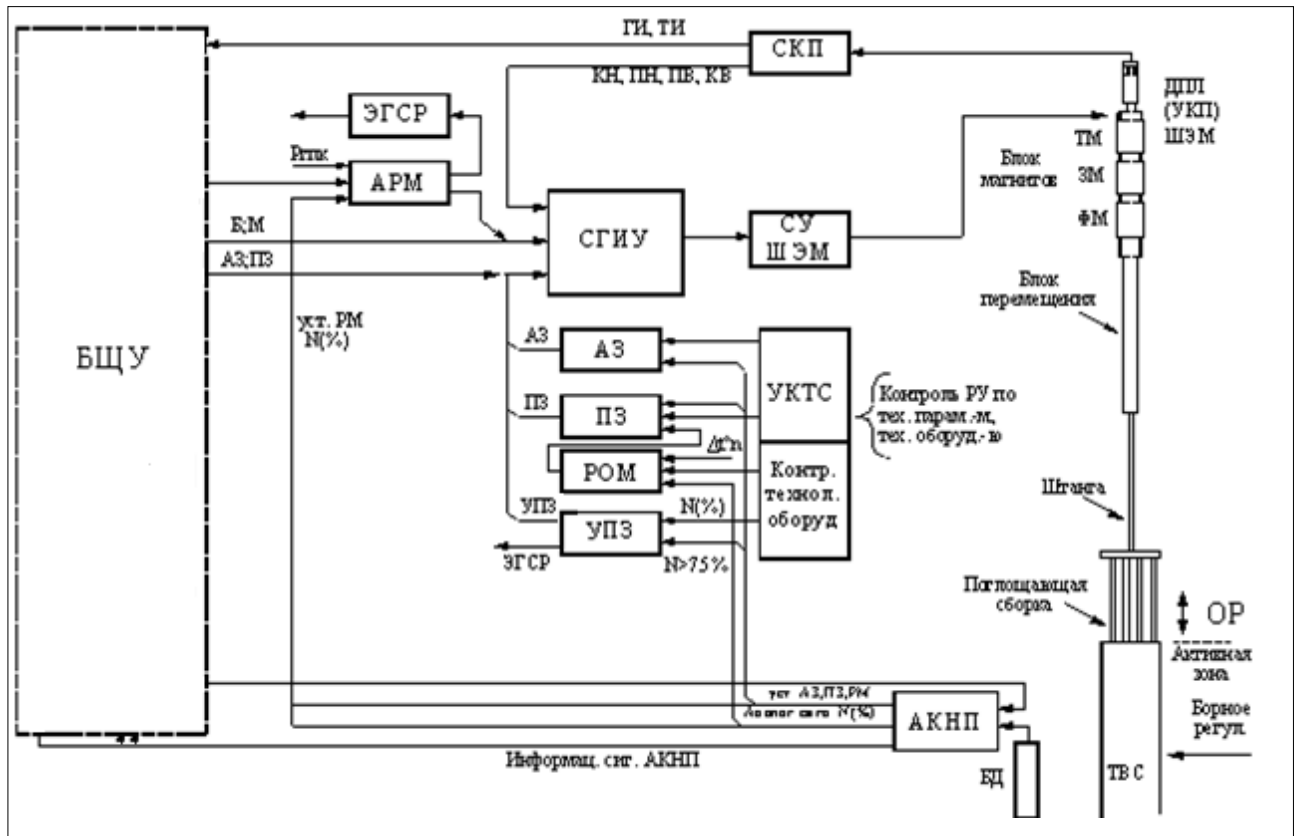


Рис. 1. Структурная схема СУЗ: АЗ – аварийная защита; АР – автоматическое регулирование; АРМ – панель автоматического регулятора мощности; БД – блок детектирования; БЩУ – блочный щит управления; АКНП – аппарат контроля нейтронного потока; ДПЛ – датчик положения линейный; ДЭ – диапазон энергетический; ЗМ – запирающий магнит; ОР – органы регулирования; ПЗ – предупредительная защита; РОМ – панель разгрузки и ограничения мощности; СКИУ – система группового и индивидуального управления; СУЗ – система управления и защиты реактора; СКП – система контроля положения; ТВС – тепловыделяющая сборка; УКТС – унифицированный комплекс технических средств; УРБ – ускоренная разгрузка блока; ФМ – фиксирующий магнит; ШЭМ – шаговый электромагнит; ТМ – тянущий магнит; ЯР – ядерный реактор.

вого шкафа аварийной команды при наличии для этого соответствующих исходных событий. Критерием успеха срабатывания ПЗ является формирование на выходе шкафа КШВ соответствующей команды ПЗ, при наличии для этого соответствующих исходных событий. Критерием успеха УПЗ является ускоренное снижение мощности реактора согласно проектному алгоритму. Критерием успеха функционирования устройства РОМ-2 является техническое недопущение превышения, установленного технологическим регламентом уровня мощности РУ в зависимости от состояния оборудования, способного обеспечить отвод тепла от РУ. Критерием успеха работы АРМ является выполнение проектных функций во всех режимах работы.

Режимы функционирования систем СКИУ, ЭП СУЗ

При возникновении сигнала АЗ снимается питание с панелей силового управления (ПСУ) и все

ОР СУЗ падают на нижний концевой выключатель (НКВ). Время падения не должно превышать 4 с. Аварийный сигнал размыкает цепи питания контакторов панелей силового питания, а также цепи оперативного тока секционных выключателей силовой нагрузки СУЗ. Таким образом, происходит полное обесточивание силового питания щита СУЗ.

При появлении сигнала ПЗ-1 сначала 10-я группа ОР СУЗ, а за ней и следующие группы поочередно, в порядке убывания номеров, кроме 5-ой группы, начнут движение вниз с рабочей скоростью по соответствующему алгоритму. Движение будет продолжаться до тех пор, пока: не снимется сигнал ПЗ-1; все группы ОР СУЗ не опустятся вниз на концевой выключатель (КВ).

При появлении сигнала ПЗ-2, на все ОР СУЗ, кроме ОР СУЗ 5-ой группы, подается сигнал запрета на движение вверх, который снимется по исчезновении сигнала ПЗ-2. Ограничений на движение ОР СУЗ вниз нет.

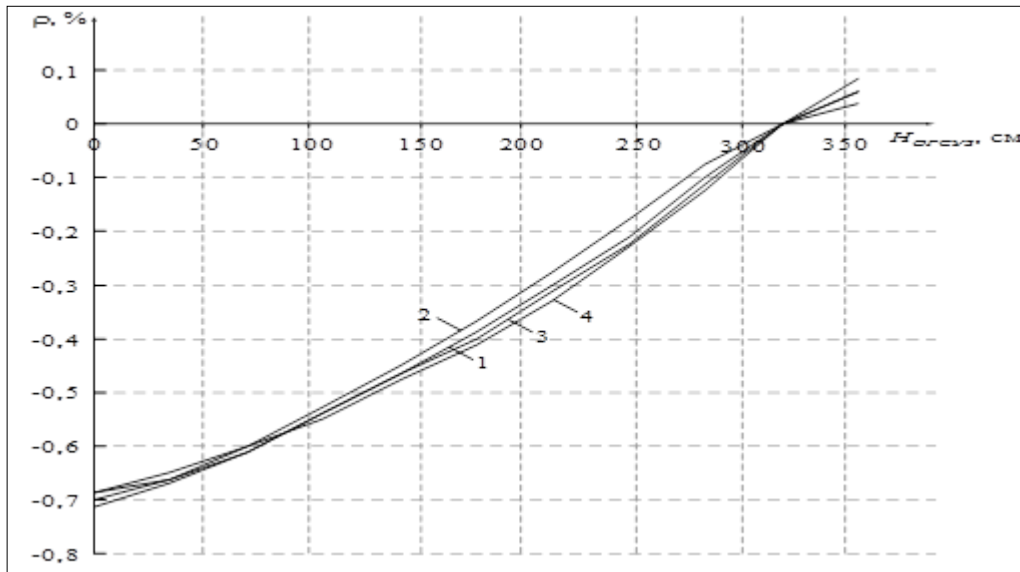


Рис. 2. Залежність реактивності регулюючої групою ОР СУЗ в залежності від висоти введення в різні кількості ефективних суток:
 1 – 0.00 ефективних суток; 2 – 80.00 ефективних суток;
 3 – 160.00 ефективних суток; 4 – 284.72 ефективних суток

При появленні сигналу УПЗ знімається живлення з приводів ОР СУЗ вибраної групою, вони падають вниз як при команді АЗ.

Робота системи електроживлення СУЗ в режимі нормальної експлуатації

Система знаходиться в роботі во всіх режимах експлуатації РУ і забезпечує живлення комплексу СУЗ постійним і змінним током від мереж силового і надійного живлення. При обесточиванні одного з видів живлення система перемикається на автоматичне включення резерва (АВР) на другий ввід, що є нормальним режимом роботи системи. Критерієм успіху системи СГІУ при спрацьовуванні АЗ є ввід ПС СУЗ в активну зону, що припиняє тим самим ланцюгову реакцію, переводячи РУ в підкритичне стан.

Структурна схема СУЗ

Структурні схеми управління і контролю в проектах автоматизації розробляють в відповідності з керівним технічним матеріалом АСУ ТП.

На структурній схемі відображаються в загальному вигляді основні рішення проекту по функціональній, організаційній і технічній структурах АСУ ТП. При цьому дотримуються ієрархія системи і зв'язи між пунктами контролю і управління, оперативним персоналом і технологічним об'єктом управління. Структурні схеми читають, як правило, знизу-вверх і зліва направо.

Структурна схема системи управління ОР і захисту реакторної установки показана на рисунку 1. На схемі відображені всі функціональні

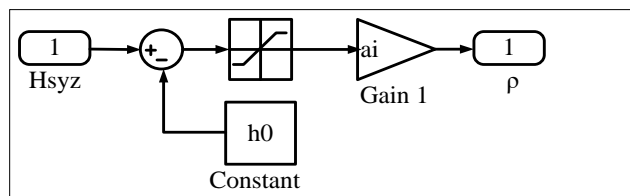


Рис. 3. Імітаційна модель ефективності регулюючої групою ОР СУЗ. Блок обмежувача в моделі дозволяє смоделивати зміну реактивності регулюючої групою ОР СУЗ, вносимої в i-й зону, в залежності від висоти поглинання стержнів в АКЗ реактора

системи, що входять до складу СУЗ, їх назви і зв'язи між собою і об'єктом управління, а також пункт контролю і управління (БЦУ), тим самим показана зв'язь оперативного персоналу з технологічним об'єктом управління.

Модель ефективності регулюючої групою ОР СУЗ

Модель ефективності регулюючої групою ОР СУЗ була отримана експериментально для блоку № 5 Запорізької АЕС. Графік залежності реактивності від висоти підйому групою для різної ефективності суток кампанії реактора показаний на рисунку 2.

Розрахунок проводився для 284.72 ефективних суток. В аналітичній формі залежність реактивності від висоти поглинання регулюючої групою ОР СУЗ краще апроксимується лінійною функцією. Максимальна реактивність, яку може внести регулююча група ОР СУЗ в одну зону:

$$\rho_{OP\text{ СУЗ}i} = a_i \cdot (h_{СУЗ} - h_0), \quad (1)$$

где $\rho_{OP\text{ СУЗ}i}$ – реактивность, вносимая регулирующей группой ОР СУЗ, в отн. ед.; a_i – коэффициент наклона характеристики, 1/см; $h_{СУЗ}$ – высота погружения регулирующей группы ОР СУЗ в АКЗ реактора, см; h_0 – начало i - и зоны снизу АКЗ, см.

В среде моделирования Simulink пакета Matlab эта зависимость была реализована следующим образом:

Выводы. Были рассмотрены оборудование систем управления защиты, режимы работы их функциональных систем, структурная схема СУЗ. Также представлена модель эффективности регулирующей группы ОР СУЗ на примере блока № 5 Запорожской АЭС.

Список литературы:

1. Технологический регламент безопасной эксплуатации энергоблока № 5 Запорожской АЭС.
2. Типовая программа подготовки на должность ведущего инженера управления реактором для АЭС с блоками ВВЭР-1000.
3. Типовая программа подготовки на должность ведущего инженера управления блоком для АЭС с блоками ВВЭР-1000.
4. Учебное пособие общего назначения по теме: «Система управления и защиты реакторной установки», 2017. 190 с.
5. Учебное пособие общего назначения по теме: «Структура ЦТАИ и структура АСУТП блока», 2017. 183 с.

ПРИЗНАЧЕННЯ ОБЛАДНАННЯ СУЗ. РЕЖИМИ РОБОТИ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ СИСТЕМ СУЗ. МОДЕЛЬ ЕФЕКТИВНОСТІ РЕГУЛЮЮЧОЇ ГРУПИ ОГАНІВ РЕГУЛЮВАННЯ СУЗ НА ЗАЕС

Одне з найважливіших завдань при експлуатації ядерного реактора – забезпечення ядерної безпеки та управління режимами його роботи. Ядерний реактор управляється головним чином за допомогою системи управління і захисту (СУЗ), тому пуск і робота реактора без системи забороняється. Об'єктом розгляду є обладнання систем управління захисту, режими роботи таких їх функціональних систем: режими функціонування системи групового та індивідуального управління (СГІУ), електроживлення (ЕП) СУЗ; режими функціонування системи апаратури контролю нейтронного потоку (АКНП); режими функціонування системи програмно-технічного комплексу аварійного захисту – попереджувального захисту (ПТК АЗ-ПЗ). Також представлена модель ефективності регулюючої групи органів регулювання (ОР) СУЗ на прикладі 5 блоку Запорізької АЕС.

Ключові слова: система управління і захисту, програмно-технічний комплекс, аварійний захист, попереджувальний захист, система групового та індивідуального управління, апаратура контролю нейтронного потоку, АЕС.

PURPOSE OF CPS EQUIPMENT. MODES OF OPERATION OF CPS FUNCTIONAL SYSTEMS. THE MODEL OF EFFICIENCY OF THE CPS REGULATORY GROUP AT ZAPORIZHIA NPP

One of the most important tasks in the operation of a nuclear reactor is to ensure nuclear safety and control its operating modes. The nuclear reactor is controlled mainly by the control and protection system (CPS), therefore, the launch and operation of the reactor without a system is prohibited. The object of consideration is the equipment of protection control systems, modes of operation of their functional systems, such as: modes of operation of the system of group and individual control (SGIC), power supply of the CPS; modes of operation of the system of neutron flux monitoring equipment; modes of operation of the software and technical complex of emergency protection - preventive protection. Also, a model of the effectiveness of the regulatory group of regulatory agencies of CPS is presented on the example of unit 5 of the Zaporizhia NPP.

Key words: control and protection system, software and hardware complex, emergency protection, preventive protection, group and individual control system, neutron flux monitoring equipment, NPP.

УДК 681.51

Бланарь П.Г.

Одесский национальный политехнический университет

Улицкая Е.О.

Одесский национальный политехнический университет

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ КОНТУРА ГЕНЕРАЦИИ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ КОГЕНЕРАЦИОННОЙ УСТАНОВКИ

Актуальность применения когенерационных энергетических установок малой мощности как альтернативных источников снабжения теплом, электричеством и горячим водоснабжением известна давно. В статье предложена система автоматического управления участка утилизации выхлопных газов и участка теплопередачи в пользовательскую сеть когенерационной энергетической установки с тепловым двигателем в виде двигателя внутреннего сгорания. Система управления синтезирована на базе нелинейной математической модели динамики участка тепловой энергии, производимой когенерационной установкой, и обеспечивает стабильную работу системы отопления и горячего водоснабжения в широком диапазоне нагрузок. Разработанная система является инвариантной к изменению температуры наружного воздуха и температуры воды в сети холодного водоснабжения.

Ключевые слова: когенерационная установка, система автоматического управления, нелинейная модель, газо-водяной теплообменник, водо-водяной теплообменник.

Постановка проблемы. Расчеты технико-экономических показателей когенерационных энергетических установок с тепловыми двигателями в виде двигателя внутреннего сгорания (ДВС) подтверждают их высокую экономичность [1]. Таким образом, подтверждается необходимость и актуальность дальнейшего изучения характеристик КЭУ как генератора энергетической продукции.

В когенерационных установках для выработки тепловой энергии используются выхлопные газы двигателей различного строения, которые через теплообменник отдают энергию в магистраль. Тепло, обычно рассеиваемое в атмосферу, в когенерационных установках утилизируется для полезного использования в бытовых или промышленных процессах.

Анализ последних исследований и публикаций. Значительные потери теплоты в централизованных системах отопления и горячего водоснабжения (ГВС) при транспортировке теплоносителей, а также невозможность их транспортировки приводят к необходимости децентрализации теплогенерирующих установок. При использовании двигателей внутреннего сгорания (поршневых двигателей) возможна утилизация тепла смазочного масла, охлаждающей воды, а также выхлопных газов.

В работе «Выбор экономичной схемы генерации тепла когенерационной энергетической

установки» [2] рассмотрены различные варианты схем регенерации когенерационной энергетической установки на базе газотурбинного двигателя, работающего по регенеративному циклу. На основании полученных данных проведен анализ и выбран наиболее экономичный вариант тепловой схемы из расчета наименьшего значения расхода топлива.

В работе А.Е. Денисовой, А.С. Мазуренко, А.С. Денисовой [3] обоснованы пути повышения эффективности КЭУ за счёт утилизации теплоты системы отопления при установке теплообменников на обратных линиях системы топления, которые подключены к сети ГВС. Однако представленные схемы утилизации тепла не обеспечивают автономности использования контура ГВС без одновременного включения контура отопления.

Вопросам моделирования когенерационной установки на базе линеаризованных математических моделей посвящены работы, отражающие вопросы регулирования электрической нагрузки и частоты вращения турбины КЭУ [4; 5]. Однако вопрос моделирования режимов потребления тепла, производимой КЭУ, остаётся открытым.

Постановка задания. Целью статьи являются разработка и анализ системы автоматического управления процессами передачи тепловой энергии потребителям тепла и горячей воды, производимой когенерационной энергетической установкой

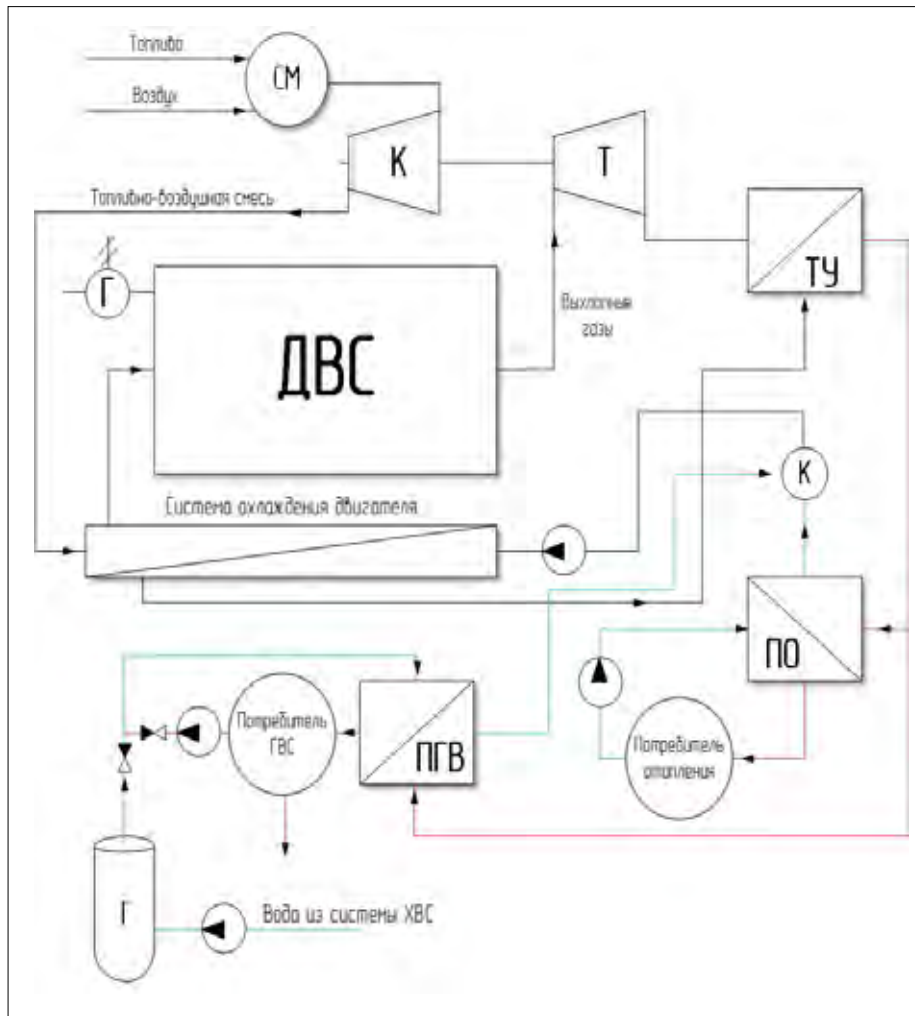


Рис. 1. Структурная схема когенерационной энергетической установки
 СМ – смеситель; К – компрессор; Т – турбина; ДВС – двигатель внутреннего сгорания; Г – генератор; ТУ – теплоутилизатор; ПО – подогреватель отопления; ПГВ – подогреватель горячего водоснабжения; ГВС – горячее водоснабжение; К – коллектор; Г – гидрофор

с двигателем внутреннего сгорания в качестве теплового двигателя.

Изложение основного материала исследования. Когенерация в Украине стремительно набирает популярность среди частных и коммерческих потребителей. Когенерационные установки способны кардинально снизить капитальные затраты на электроснабжение и отопление. Они окупают себя уже через 3–4 года постоянной эксплуатации. Фактически когенерационные установки можно рассматривать как аналог стационарной электростанции. В отличие от солнечных и ветряных электростанций, в когенерационных установках выработка электрической и тепловой энергии происходит постоянно в круглосуточном режиме – независимо от времени суток, времени года и температуры окружающей среды [6].

Электрическая полезная энергия возникает в результате процесса сгорания топлива в ДВС и

посредством его вращательного движения преобразуется с помощью синхронного генератора в электрический ток. Тепловая энергия, полученная в результате процесса сгорания этого же топлива в ДВС, представляется как тепло выхлопных газов, блока двигателя и смазочной системы двигателя.

Экономное использование первичной энергии топлива достигается благодаря рекуперации тепла от выхлопных газов, охлаждающей жидкости двигателя, смазки двигателя.

Общая структурная схема рассматриваемой КЭУ представлена на рисунке 1.

В статье ставится задача синтеза системы управления процессами передачи тепловой энергии потребителям тепла и горячей воды, производимой КЭУ с ДВС.

Рис. 2 демонстрирует основные аппараты, параметры управляемых и регулирующих пото-

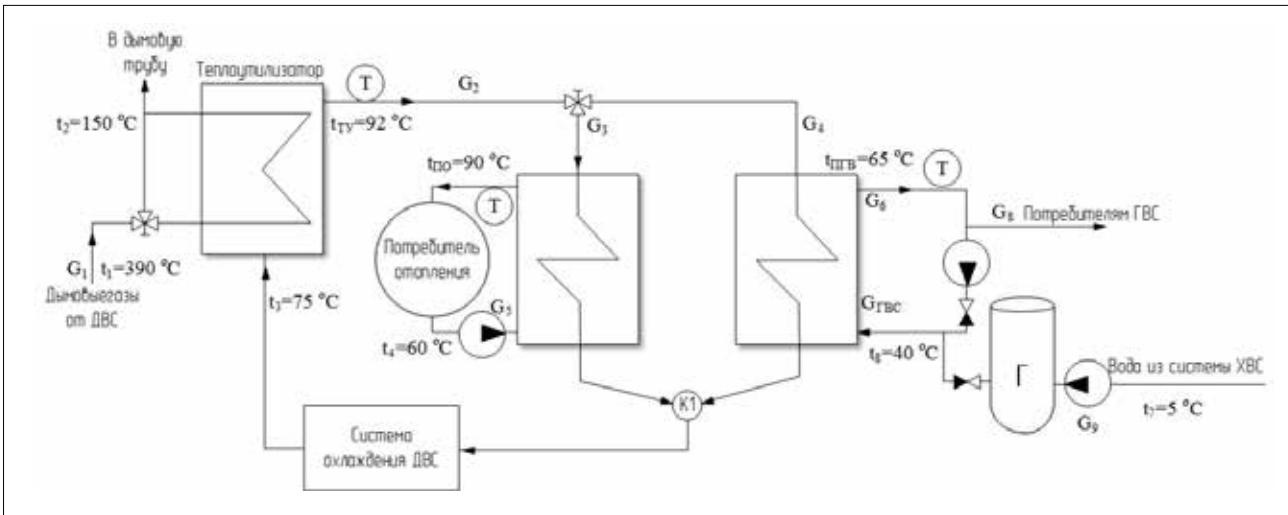


Рис. 2. Структурная схема САУ рассматриваемого участка

ков розробляваної системи автоматичного управління (САУ).

Розроблена система нелінійних рівнянь, описуючих динаміку контура генерації теплової енергії когенераційної установки, має вигляд [7]:

$$\frac{dt_{TY}}{d\tau} = \frac{t_3 \cdot Cp_3 \cdot G_2 + G_1 \cdot (t_1 \cdot Cp_1 - t_2 \cdot Cp_2) - t_{TY} \cdot Cp_{TY} \cdot G_2}{m_{TY} \cdot Cp_{TY}^{sp}}, \quad (1)$$

$$\frac{dt_{ПО}}{d\tau} = \frac{t_4 \cdot Cp_4 \cdot G_5 + G_3 \cdot (t_{TY} \cdot Cp_{TY} - t_5 \cdot Cp_5) - t_{ПО} \cdot Cp_{ПО} \cdot G_5}{m_{ПО} \cdot Cp_{ПО}^{sp}}, \quad (2)$$

$$\frac{dt_{ПГВ}}{d\tau} = \frac{\frac{t_{ПГВ} \cdot G_7 + t_7 \cdot G_9}{G_7 + G_9} \cdot Cp_8 \cdot G_{ГВС} + G_4 \cdot (t_{TY} \cdot Cp_{TY} - t_6 \cdot Cp_6) - t_{ПГВ} \cdot Cp_{ПГВ} \cdot G_6}{m_{ПГВ} \cdot Cp_{ПГВ}^{sp}}, \quad (3)$$

Параметрами стану системи є температури теплоносія на виході теплоутилизатора (t_{TY}), на виході водо-водяного підогревателя опітальної мережі ($t_{ПО}$) і теплоносія на виході водо-водяного підогревателя гарячого водоснабження ($t_{ПГВ}$).

Управляючими впливами в САУ є витрата димових газів (G_1) і витрата води для підогревателя опітальної мережі (G_3).

К зовнішнім впливаючим впливам відносяться температури вихлопних газів на вході в ТУ (t_1), обігріваної води на вході в теплоутилизатор (t_3), обігріваної середовища на вході в водо-водяний підогреватель опітальної мережі (t_4), а також температура і витрата води з мережі ХВС (t_7 і G_9).

Система диференціальних рівнянь (1)–(3) доповнюється алгебраїчeskими рівняннями для описання залежності теплоємності і густоти води як основного теплоносія системи гарячого водоснабження і опітання від температури. Нелінійна система рівнянь розв'язується методом Ейлера з кроком дискретності $\Delta t=1$ с [7].

Розроблявана система автоматичного управління є інваріантною до збурюючої температури зовнішнього повітря, теперішнє значення якої визначає уставку для температури на виході мережі опітання.

Температурний графік для системи опітання (рис. 3) апроксимовано залежністю (4), зв'язуючою необхідну температуру теплоносія на виході підогревателя опітальної мережі і температури повітря.

$$t_{ПО} = -0.0066 \cdot t_{ВОЗД}^2 - 1.6 \cdot t_{ВОЗД} + 58, \quad (4)$$

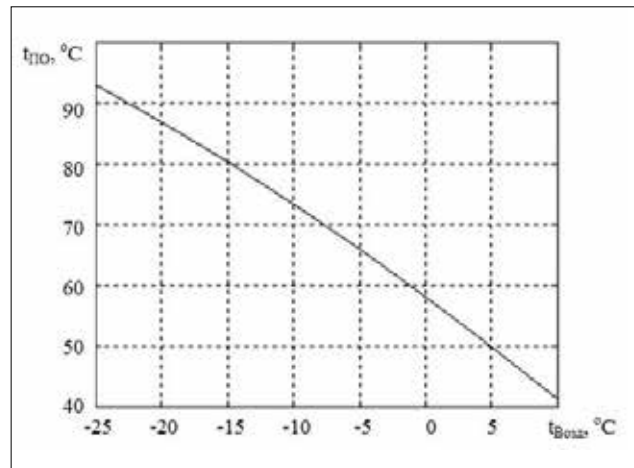


Рис. 3. Температурный график для системы отопления

Підтримання заданого витрати і тиску води в системі ГВС здійснюється насосною станцією, включаючою насос, гідроакумулятор на 100 л, манометр і реле тиску.

Регулювання температур теплоносіїв на виході підогревателя опітальної мережі ($y_1=t_{ПО}$) і підогревателя мережі гарячого водоснабження

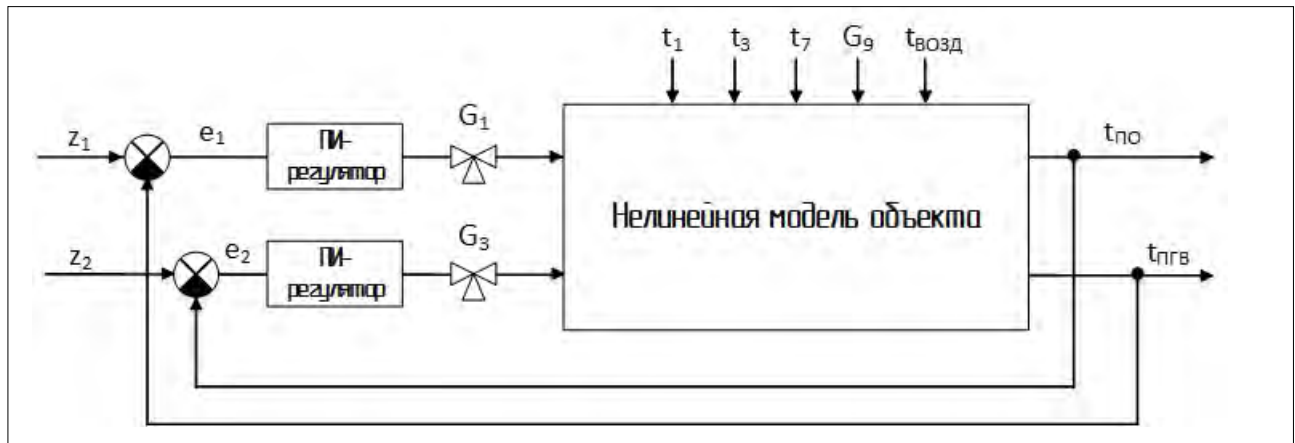


Рис. 4. Структурная схема разработанной САУ

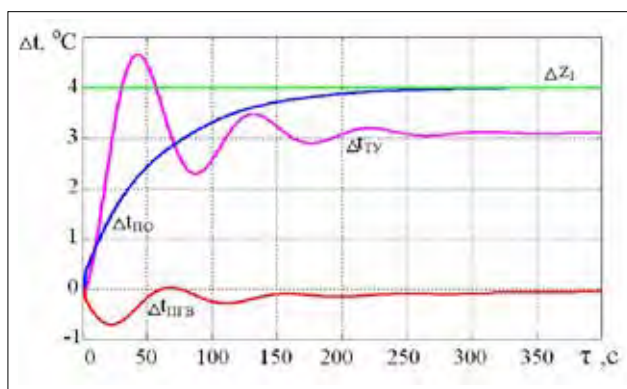


Рис. 5. Переходный процесс регулирования температур ТК при действии возмущений $\Delta t_{\text{ВОЗД}} = -3^\circ\text{C}$ и $\Delta t_{\text{ХВС}} = 3^\circ\text{C}$

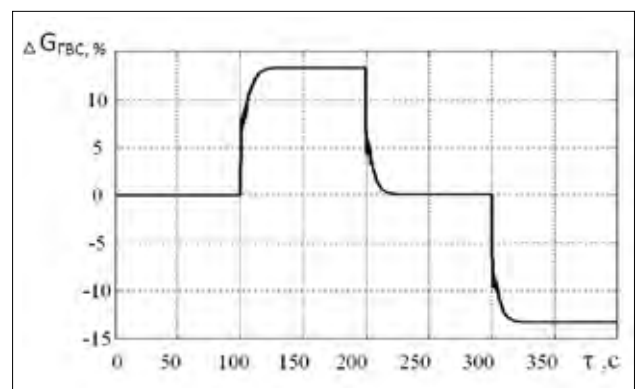


Рис. 6. Моделирование колебаний потребления горячей воды в сети ГВС

($y_2 = t_{\text{пгв}}$) осуществляется с помощью цифровых ПИ-регуляторов, уравнения которых имеют вид (5):

$$u_i = u_{i-1} + k_1 \cdot e_i + k_2 \cdot e_{i-1}$$

$$e_i = z_i - y_i$$

$$k_1 = K_p$$

$$k_2 = K_p \cdot \left(\frac{\Delta t}{T_{\text{и}}} - 1 \right).$$

Таким образом, замкнутая система регулирования включает нелинейную модель объекта и модель ПИ-регуляторов, с рассчитанными настройками K_p и $T_{\text{и}}$, задание регулятору $z_1 = f(t_{\text{возд}})$ определяется в соответствии с выражением (4), а $z_2 = 65^\circ\text{C}$, в соответствии со СНиП 2.04.01.

Структурная схема разработанной системы автоматического управления представлена на рис. 4.

Указанное возмущение по температуре воздуха приводит к изменению задания по температуре воды в сеть потребителей отопления (задание увеличивается на $\Delta z_1 = +4^\circ\text{C}$). Переходной процесс по заданию в подогревателе отопления длится менее 3 минут (178 с). Одновременное возмуще-

ние по температуре воды в сети ХВС приводит к отклонению температуры воды в сети горячего водоснабжения $\Delta t_{\text{пгв}}$. Данное возмущение отрабатывается регулятором менее чем за 5 минут, а максимальное отклонение температуры воды в сети ГВС составляет менее 1°C , что отвечает нормам для жилых домов.

Также на рис. 5 показано поведение третьего параметра состояния (пурпурная кривая) – отклонение температуры теплоносителя на выходе теплоутилизатора. Указанные возмущения привели к открытию клапана дымовых газов, подаваемых в тепловой комплекс, а также клапана подачи теплоносителя в ПО для стабилизации температур воды в сети отопления и горячей водоснабжения.

Также исследовалось влияние потребления воды в сети ГВС на температуру воды на выходе подогревателя горячей воды, возмущаемой температурой смеси обратной воды сети ГВС и воды сети ХВС, добавляемой для восстановления заданного расхода и давления в сети горячего водоснабжения. На рис. 6 представлены результаты моделирования колеба-

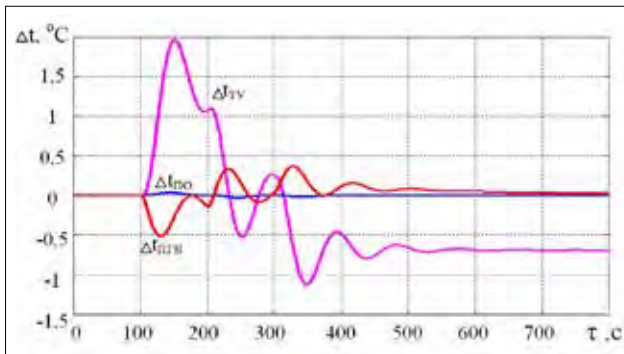


Рис. 7. Переходный процесс регулирования температур ТК при действии возмущений со стороны потребления воды в сети ГВС

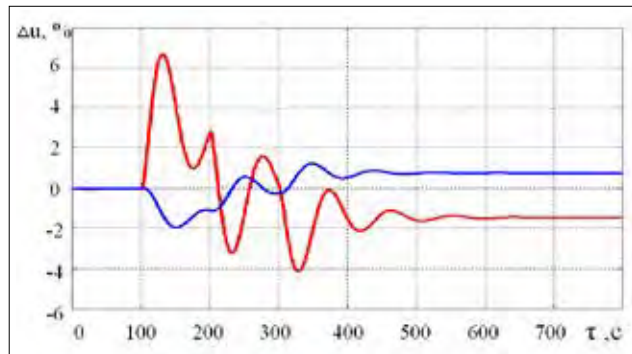


Рис. 8. Управляющее воздействие САУ теплового комплекса (красный – расход дымовых газов, синий – расход теплоносителя в ПО)

ний потребления горячей воды (в диапазонах $\pm 13\%$ от номинального). Переходные процессы регулирования в тепловом комплексе, вызванные данным возмущением, представлены на рис.7. Также исследовалось влияние потребления воды в сети ГВС на температуру воды на выходе подогревателя горячей воды, возмущаемой температурой смеси обратной воды сети ГВС и воды сети ХВС, добавляемой для восстановления заданного расхода и давления в сети горячего водоснабжения. На рис. 6 представлены результаты моделирования колебаний потребления горячей воды (в диапазонах $\pm 13\%$ от номинального). Переходные процессы регулирования в тепловом комплексе, вызванные данным возмущением, представлены на рис.7.

Анализ переходных процессов регулирования показывает, что температура воды в сети ГВС стабилизируется регулятором расхода дымовых газов при изменении потребления горячей воды на бытовые нужды. В свою очередь, этот переходной процесс вносит незначительные возмущения в сети отопления, которое обрабатывается регулятором расхода теплоносителя в подогреватель отопления (рис. 8).

Таким образом, после проведения дополнительных исследований работы разработанной системы управления процессами теплопередачи в контуре генерации тепловой энергии КЭУ была

доказана эффективность ее работы. САУ инвариантна к возмущению по температуре воздуха, так как разработанная математическая модель объекта учитывает зависимость температуры теплоносителя на выходе в сеть отопления от температуры окружающей среды, а система регулирования переводит объект на новое задание.

Отклонения температуры в сети ХВС и расхода в сети ГВС от номинальных обрабатываются регулятором расхода дымовых газов, температура в сеть отопления при этом корректируется регулятором расхода теплоносителя в подогревателе отопления.

Выводы. Разработана автоматическая система регулирования тепловых потоков КЭУ, обеспечивающая стабильные температуры теплоносителей в сети отопления и горячего водоснабжения. Положенная в основу САУ нелинейная математическая модель позволяет исследовать работу системы при действии различных возмущений. Среди них возмущения, связанные с отклонениями температуры дымовых газов как основного теплоносителя теплового комплекса, температуры воздуха, задающей температуру воды на выходе в сеть отопления. Промоделированы процессы изменения расхода воды потребителями системы горячего водоснабжения, при этом САУ обеспечивает заданные СНиП отклонения температур воды в сети ГВС и отопления.

Список литературы:

1. Бундюк А.М., Уліцька О.О. Розробка алгоритму для розрахунку статички когенераційної енергетичної установки. Холодильна техніка і технологія. 2013. № 3(143). С. 34–40.
2. Тодорцев Ю.К., Тарахтий О.С., Бундюк А.Н. Выбор экономической схемы генерации тепла когенерационной энергетической установки. Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2015. № 2 (74). С. 17–22.
3. Денисова А.Е., Мазуренко А.С., Денисова А.С. Повышение эффективности взаимодействия парогазовых когенерационных установок с системой теплоснабжения. Проблемы региональной энергетики. 2015. № 2(28). С. 88–97.

4. Sengül M., Yörükeren N. Modeling and Simulation of the Combined Heat and Power Plant of Real Industrial System. 33rd IASTED International Conference on Modeling, Identification and Control Innsbruck. 2002.
5. Sun T., Lu J., Li Z. Modeling Combined Heat and Power Systems for Microgrid Applications. IEEE Transactions on Smart Grid. 2017. № 9. P. 4172–4180.
6. Когенерационные установки. Киев, 2015. URL: <https://nvp-vital.com/kogeneraciya> (дата обращения 20.07.2018).
7. Бланарь П.Г., Бундюк А.Н., Улицкая Е.О. Разработка математической модели и анализ динамики контура генерации тепловой энергии когенерационной установки. Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. 2018. Том 29(68) Ч. 1. № 3. С. 95–100.

РОЗРОБКА СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ КОНТУРУ ГЕНЕРАЦІЇ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ КОГЕНЕРАЦІЙНОЇ УСТАНОВКИ

Когенерація є популярною серед приватних та комерційних споживачів. Когенераційні установки можуть суттєво зменшити капітальні витрати на електроенергію та опалення. В статті розглядається питання синтезу системи управління теплового комплексу когенераційної установки, в який входять системи гарячого водопостачання та опалення. Модель об'єкта управління описується системою нелінійних рівнянь. Розроблена система управління складається з двох ПІ-регуляторів, які змінюють витрату димових газів, що надходять до теплоутилізатора, та розподіляють витрату теплоносія між підігрівачем опалення та підігрівачем гарячої води. Проведено дослідження системи автоматичного управління при дії різноманітних збурень із боку зміни температури димових газів, коливань витрати води, що споживається в системі гарячого водопостачання, та температури води, що надходить до системи гарячого водопостачання. Перевагою розробленої системи управління є інваріантність до збурень із боку коливань температури повітря, яка впливає на зміну завдання регулятора температури теплоносія в системі опалення.

Ключові слова: когенераційна установка, система автоматичного управління, нелінійна модель, газо-водяний теплообмінник, водо-водяний теплообмінник.

DESIGN OF THE AUTOMATIC CONTROL SYSTEM OF COMBINED HEAT AND POWER PLANT THERMAL ENERGY GENERATION CIRCUIT

Cogeneration is popular among private and commercial consumers. Cogeneration units can significantly reduce capital costs for electricity and heating. The article is focused on the issue of control system synthesis of combined heat and power plant thermal energy generation circuit, which includes hot water supply and heating system. The model of the control object is described by a system of nonlinear equations. The developed control system consists of two PI regulators that change the flow of flue gases entering the heat utilizer and distribute the coolant flow between the heating heater and the hot water heater. The research of automatic control system under the influence of various perturbations like changes in the temperature of flue gases, fluctuations in the flow of water consumed in the hot water supply system and the temperature of water entering the hot water supply system has been carried out. The advantage of the developed control system is the invariance to perturbations caused by fluctuations in the air temperature, which affects the task change of the temperature regulator of the coolant in the heating system

Key words: CHP-plant, automation control system, nonlinear model, gas-water heat exchanger, water-and-water heater.

УДК 681.51

Бойко О.В.

Одеський національний політехнічний університет

Пелих С.В.

Одеський національний політехнічний університет

РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ВЛАСТИВОСТЯМИ ЯДЕРНОГО ПАЛИВА ВВЕР-1000 ДЛЯ ПРОГРАМИ РЕГУЛЮВАННЯ ПОТУЖНОСТІ РЕАКТОРА З ПОСТІЙНИМ ТИСКОМ ПАРИ ДРУГОГО КОНТУРУ

Енергоблоки АЕС з реакторами ВВЕР-1000, які експлуатуються на чотирьох АЕС, є найпотужнішими на території України. У зв'язку з тим, що є суттєва невідповідність між виробленням і споживанням електричної енергії в енергосистемі країни протягом доби, а також у зв'язку з тим, що сумарна частка установок, призначених для регулювання добового графіка навантаження енергосистеми, дуже мала, стає актуальною адаптація чинних енергоблоків до нових специфічних умов роботи шляхом створення автоматизованої системи регулювання (АСР) потужності енергоблоку, яка дасть змогу експлуатувати енергоблоки АЕС у маневрених режимах.

Ключові слова: тепловидільний елемент (ТВЕЛ), атомна електрична станція (АЕС), автоматизація, активна зона (АКЗ), режим маневрування потужністю.

Постановка проблеми. Нині всі українські АЕС з ВВЕР-1000 експлуатуються в режимі стабілізації потужності енергоблоку на заданому рівні, хоча обладнання 1-го контуру розраховане на експлуатацію в режимі маневрування потужністю. Це, насамперед, пов'язано з тим, що нині маневрування потужністю реакторної установки (РУ) здійснюється операторами в ручному режимі і тільки на вимогу диспетчерів енергосистеми. Виконання маневру операторами РУ в ручному режимі дуже небезпечно, адже під час управління необхідно одночасно контролювати зміну багатьох нейтронно-фізичних і технологічних параметрів, що призводить до необхідності враховувати вплив людського фактору на безпеку АЕС.

Рішенням цього завдання може стати створення АСР потужності енергоблоку, яка дасть змогу експлуатувати енергоблок у режимі маневрування потужністю з вимогою, щоб надійність і безпека енергоблоку були знижені, а економічна ефективність енергоблоку зберігалася на необхідному рівні.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Науковці Бойко О.В. і С.В. Пелих у роботі показали необхідність і умови розробки автоматизованої системи управління технологічним процесом експлуатації твєлів легко-водяного реактора з урахуванням накопиченої в нормальних умовах пошкодженості їх оболонок із метою підвищення економічної ефективності експлуатації твєлів

шляхом управління їх властивостями за дотримання вимог безпеки [6, с. 10].

Постановка завдання. Метою роботи є розробка АСР потужності енергоблоку АЕС із реактором ВВЕР-1000 у режимі К.

Під режимом К мається на увазі комбінована програма з підтриманням постійного тиску у другому контурі за умови малих навантажень та постійної середньої температури теплоносія першого контуру за умови великих навантажень.

Потужність реактора має відповідати заданому значенню, коефіцієнт розмноження має дорівнювати одиниці, а реактивність – нулю. Однак при експлуатації реактора коефіцієнт розмноження змінюється через вигорання палива, отруєння, шлакування, дію температурного і потужнісного ефектів.

Щоб підтримувати реактори у критичному стані, необхідно змінювати властивості активної зони заради компенсації зазначених ефектів. Вплив на реактивність принципово можна такими способами:

- збільшенням або зменшенням кількості матеріалу, що ділиться в активній зоні;
- зміною величини витоку нейтронів з активної зони;
- зміною величини поглинання нейтронів.

Найбільшого поширення набув спосіб зміни реактивності шляхом зміни величини поглинання нейтронів. При цьому можливі такі способи:

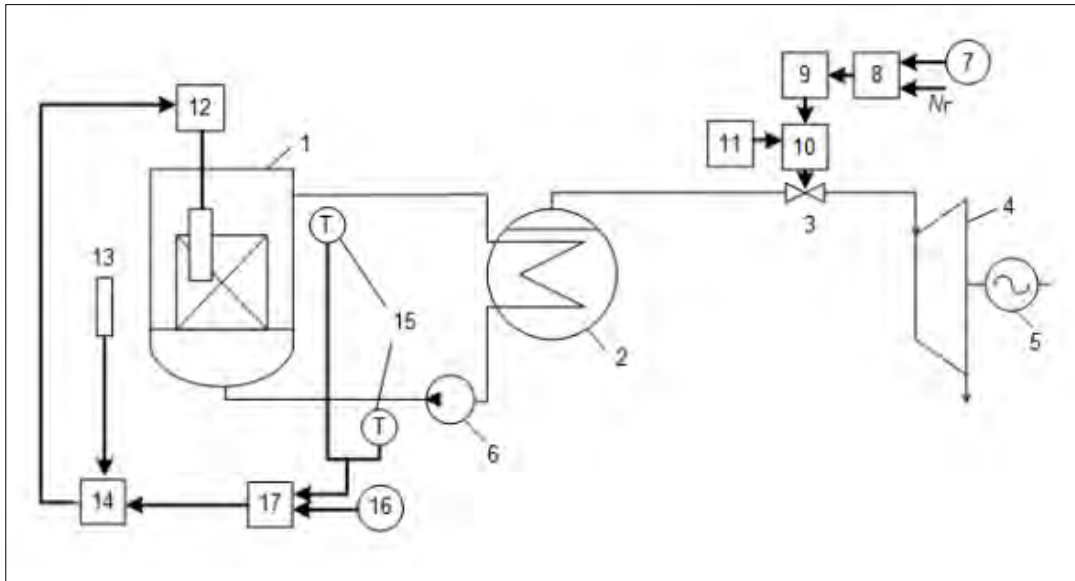


Рис. 1. Принципова схема регулювання потужності енергоблоку з реактором ВВЕР-1000, яка реалізує комбіновану програму регулювання при великих навантаженнях:
 1 – реактор; 2 – парогенератор; 3 – регулюючий клапан турбіни; 4 – турбіна; 5 – генератор;
 6 – головний циркуляційний насос; 7 – датчик електричної потужності генератора;
 8 – регулятор потужності енергоблоку; 9 – механізм управління турбіною; 10 – сервомотор;
 11 – регулятор частоти обертання турбіни; 12 – приводи регулюючих стрижнів; 13 – іонізаційна камера; 14 – регулятор нейтронної потужності реактора; 15 – датчики температури теплоносія першого контуру; 16 – датчик середньої температури теплоносія першого контуру; 17 – регулятор середньої температури теплоносія першого контуру.

- регулювання рухливими твердими поглиначами нейтронів;
- рідинне регулювання, коли змінюється рівень або щільність рідкого поглинача в спеціальних каналах,
- газове регулювання, коли змінюється висота поглинаючого стовпа газу, або його концентрація, або щільність;
- хімічне регулювання, коли змінюється концентрація поглинача в теплоносії;
- компенсація реактивності рухливими вигоряючими поглиначами. такий поглинач завантажується разом з ядерним паливом і постійно вигоряє. При цьому компенсується реактивність шляхом вигорання і зашлакування палива.

Незважаючи на велику кількість способів управління реактивністю, регулювання реакторами здійснюється твердими поглиначами (з додатковим застосуванням хімічної регулювання у ВВЕР).

Оскільки СУЗ реакторів служить для компенсації реактивності, регулювання потужності і захисту, розрізняють такі органи регулювання:

- компенсуючі стрижні;
- регулюючі стрижні;
- стрижні аварійного захисту.

Компенсуючі стрижні (КС) або ручного регулювання (РР) призначені для компенсації великих, але повільних змін реактивності.

Стрижні автоматичного регулювання (АР) призначені для компенсації швидких, але малих змін реактивності.

Стрижні аварійного захисту (АЗ) призначені для швидкого припинення ланцюгової реакції в аварійних випадках. У найбільш небезпечних ситуаціях проводиться скидання стрижнів АЗ в активну зону.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Енергоблок із реактором ВВЕР-1000 – самостійна частина атомної електростанції, яка являє собою технологічний комплекс для виробництва електроенергії шляхом використання енергії, виділеної під час контрольованої ядерної реакції. Енергоблок працює на енергосистему з великою кількістю споживачів електроенергії.

Енергоблок із реактором ВВЕР-1000 має два контури.

Перший контур – радіоактивний. Тепло у реакторі виділяється завдяки ланцюговій реакції ділення ядерного палива під дією теплових нейтронів.

Теплоносієм 1-го контуру є вода під високим тиском із розчищеною в ній борною кислотою. Внаслідок ланцюгової реакції поділу ядер урану-235 у твелах реактора ВВЕР-1000 виділяється тепло. Під час проходження теплоносія через

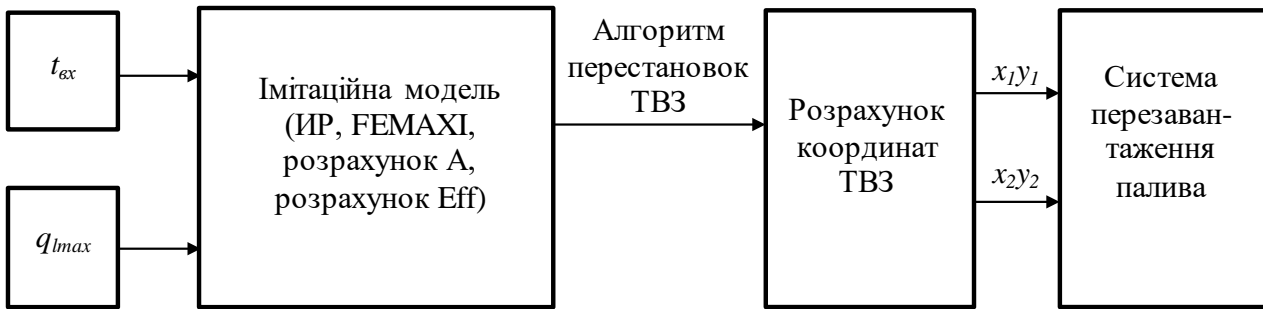


Рис. 2. Схема регулювання властивостями палива

активну зону реактора відбувається його нагрівання шляхом тепловіддачі від оболонок твєлів. Із реактора теплоносії надходять у ПГ.

Другий контур – нерадіоактивний. У ПГ теплоносії через поверхні теплообміну віддає отриману в реакторі теплоту живильній воді парогенератора, яка перебуває під тиском 6 МПа. Охолоджений у ПГ теплоносії за допомогою ГЦН повертається назад у реактор.

Насичений пар, який виробляється у парогенераторі, через паропровод поступає на турбіну, яка приводить у дію генератор, що виробляє електричний струм [1, с. 50].

Із метою управління та захисту ядерного реактора використовують регулюючі стрижні, які можна переміщувати по всій висоті активної зони. У разі глибокого введення ланцюгова реакція стає неможливою, оскільки нейтрони сильно поглинаються та виводяться із зони реакції. Це відбувається тому, що стрижні вироблені з матеріалу, який має високу ступінь поглинання нейтронів [2, с. 58].

Переміщення стрижнів виконується дистанційно з пульту управління. У разі невеликого переміщення стрижнів ланцюговий процес буде або розвиватися, або затухати. Таким чином регулюється потужність реактора. У разі великих навантажень комбінована програма підтримує постійною середню температуру теплоносія першого контуру, при цьому тиск пари у другому контурі в разі значних відхилень перебуває у допустимих рамках.

Схема регулювання потужності енергоблоку з ВВЕР-1000 за комбінованою програмою при великих навантаженнях зображена на рис. 1.

Щоб зрозуміти, як саме функціонує програма регулювання, далі опишемо її роботу.

Персонал енергоблоку з метою збільшення/зменшення потужності за допомогою датчика 7 змінює задане значення, і при цьому регулятор потужності енергоблоку 8 залежно від сигналу

неузгодженості формує управляючу команду, яка передається механізму управління турбіною 9. Механізм управління турбіною 9 за допомогою сервомотора 10 відкриває/закриває регулюючий клапан 3 турбіни 4. Таким чином, електрична потужність генератора буде змінюватись до тих пір, поки сигнал неузгодженості не дорівнюватиме нулю.

У разі відкриття/закривання регулюючого клапану турбіни тиск пари перед турбіною та у парогенераторі 2 зменшиться/збільшиться, що, відповідно, приведе до зменшення/збільшення тиску пари та температури насичення у парогенераторі, тобто кількість тепла, що відводиться другим контуром, збільшиться/зменшиться.

Раніше описані процеси призведуть до того, що температура теплоносія першого контуру на виході з парогенератора зменшиться/збільшиться. Разом із нею зменшиться/збільшиться і середня температура теплоносія.

Регулювання нейтронної потужності здійснюється за допомогою автоматичного регулятора потужності (АРП). АРП складається з регулятора середньої температури теплоносія першого контуру 17 та регулятора нейтронної потужності 14. За допомогою датчика 16 та датчиків 15 середньої температури першого контуру формується сигнал неузгодженості, тим самим регулятор середньої температури теплоносія першого контуру випрацьовує коригуючий сигнал на регулятор нейтронної потужності.

Далі регулятор нейтронної потужності змінює положення регулюючих стрижнів 12, що призводить до підтримання постійного значення середньої температури теплоносія першого контуру [3, с. 108].

Схема регулювання властивостями палива атомного реактору.

Беручи за основу розрахунок моделі перестановок ТВЗ в ядерному реакторі, створено систему

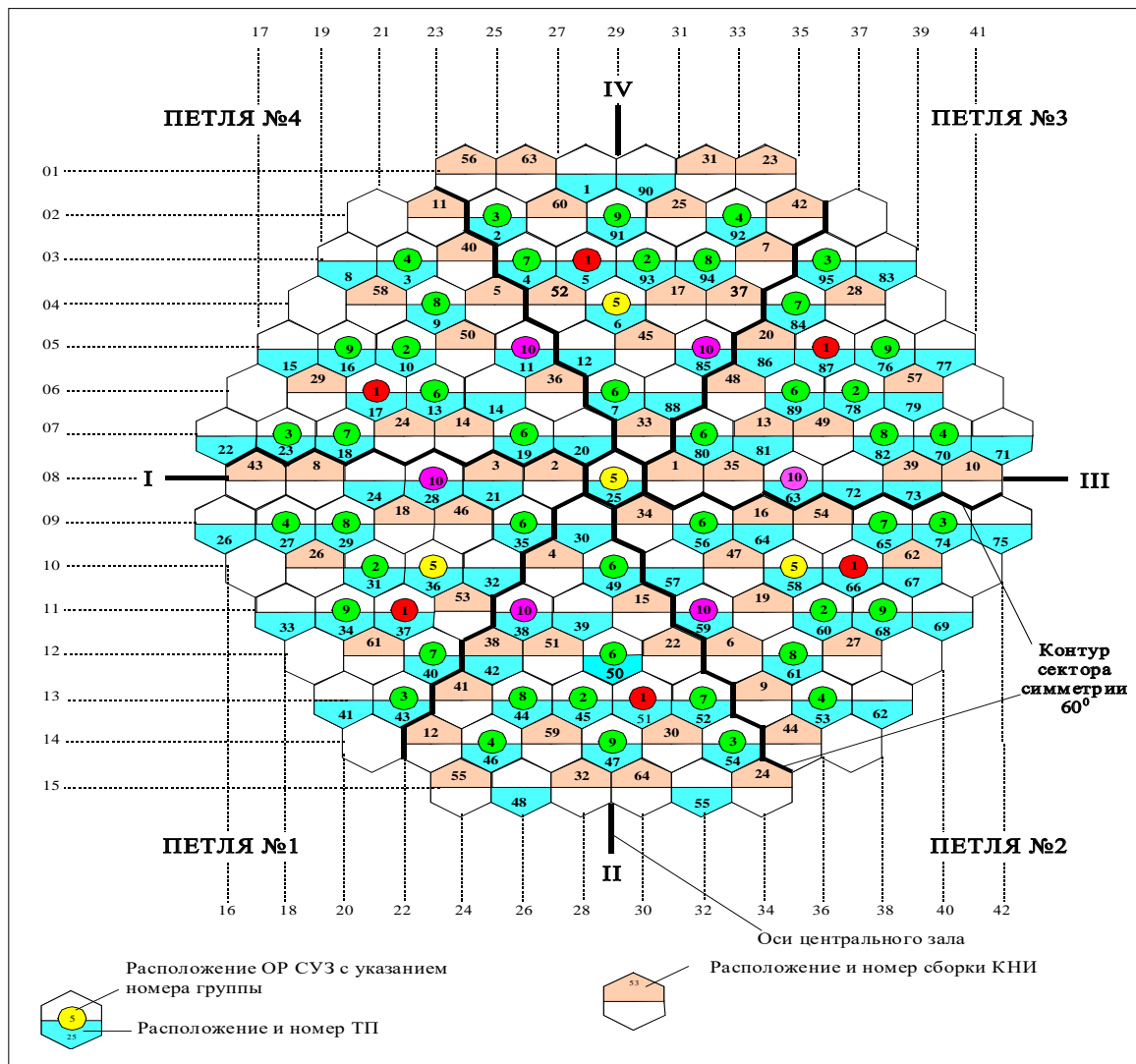


Рис. 3. Розміщення ТВЗ в активній зоні ЯР

регулювання властивостями палива ядерного реактору типу ВВЕР–1000 (рис. 2).

У розрахунку імітаційної моделі використовуються сигнал за вхідною температурою теплоносія t_{ex} та максимальною лінійною потужністю у твелі q_{lmax} .

t_{ex} вимірюється термпарою на вході однієї із петлі та вважається постійною. Значення q_{lmax} для 8 АС твела розраховуються із 7 сигналів датчика з метою виміру нейтронного потоку по висоті. Ці датчики входять до системи внутрішнього реакторного контролю.

Розрахунок проводиться використовуючи програми «Імітатор реактора» і «FEMAXI» на основі ЕВТП-метода. Із 8 розрахованих алгоритмів перестановок ТВЗ знайдений найефективніший алгоритм перестановок ТВЗ (номер 3), який фактично є послідовністю номерів комірок АКЗ.

Через номер комірки АКЗ визначаються фізичні координати кожної збірки x, y на кожен рік паливної компанії.

Ці координати передаються у системі перезавантаження топлива як вхідні сигнали.

Розрахунок найоптимальнішого шляху перестановки ТВЗ

Загалом можна виділити три типи ТВЗ: вивантажувані, переміщувані і завантажувані. Крім них, є ще один вид транспортованих конструкцій – заглушки. На відміну від ТВЗ, які треба переставити один раз, заглушки можна переставляти багаторазово.

Обмеження для кожного типу ТВЗ

ТВЗ, що вивантажується, може бути переміщена на склад, якщо для кожної з її сусідніх ТВЗ після її вилучення буде виконуватись одна з умов опори:

- 1) ТВЗ межує з менш ніж шістьма комірками реактора, а не менше двох із них зайняті ТВЗ або заглушками;
- 2) ТВЗ межує з шістьма комірками реактора, не менше трьох із них зайняті заглушками або ТВЗ;

3) ТВЗ межує з шістьма комітками реактора, дві з них зайняті ТВЗ або заглушками, але при цьому вони розміщені з протилежних боків зазначеної ТВЗ.

Переміщені ТВЗ можуть бути переставлені, якщо комітка призначення вільна і після її витягання для її сусідніх ТВЗ будуть виконуватись умови опори. Після її установки для неї також мають виконуватись умови опори сусідніх ТВЗ.

Завантажена ТВЗ може бути переміщена, якщо позиція, в яку її варто встановити, вільна і після установки для неї будуть виконуватись умови опори сусідніх ТВЗ, а також умова попередньої заправки:

1. або в реактор завантажено менше 18 ТВЗ;
2. або завантажено 18 і більше, але при цьому всі ці ТВЗ переставлені в нові позиції.

Опис алгоритма перестановки:

1. знаходимо ТВЗ, найблищу до стартової точки і для якої переміщення дозволено, виконуємо переміщення цієї ТВЗ;

2. знаходимо наступну ТВЗ, для якої переміщення дозволено, і найблищу до позиції тільки-но переміщеної ТВЗ. Виконуємо переміщення цієї ТВЗ. Виконуємо крок 2 доти, поки не будуть виконані всі перестановки або алгоритм не зайде в глухий кут (залишились непереміщені ТВЗ, але переміщення для них заборонено);

3. якщо виконані не всі переміщення і більше немає варіантів переміщення, то пересуваються заглушки;

4. знову виконуються кроки 3 та 4;

5. кран повертається в фінішну позицію.

На рис. 3 зображено розміщення ТВЗ в активній зоні ядерного реактору типу ВВЕР-1000.

Координата басейну (20.4,2.425), координата складу (11.4,2.425), координата початкової позиції крану (20.4,0.0), координата кінцевої позиції крану (19.0,0.0). Швидкість крану в активній зоні реактора – 0,6 м/с. Ділянка активної зони – коли координата по осі X не перевищує 5,4 м [4, с. 87].

Висновки. Розроблені основи автоматизованої системи управління властивостями палива ядерного реактору, а саме вигоранням ЯП та пошкодженням оболонок твелів. Основними вхідними даними моделей розрахунку параметру деформаційного пошкодження оболонок та оптимізації перестановок ТВЗ є температура теплоносія t_{ex} на вході АКЗ і значення коефіцієнтів нерівномірності енерговиділення для аксіальних сегментів усередненого за ТВЗ твела для кожної комітки АКЗ. Вихідними параметрами моделі оптимізації перестановок ТВЗ є декартові координати коміток АКЗ, що призначені для кожної ТВЗ, яка перевстановлюється.

Список літератури:

1. Pelykh S.N., Maksimov M.V., Ryabchikov S.D. The prediction problems of VVER fuel element cladding failure theory. Nuclear Engineering and Design. 2016. Vol. 302. Part A, (June). P. 46–55.
2. Pelykh S.N., Parks G.T., Maksimov M.V. A method for VVER-1000 fuel rearrangement optimization taking into account both fuel cladding durability and burnup. Nuclear Engineering and Design. 2013. Vol. 257. № 4. P. 53–60.
3. Pelykh S.N., Nikolsky M.V., Maksimov M.V. A method for minimization of cladding failure parameter accumulation probability in VVER fuel elements. Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Physics of Radiation Effect and Radiation Materials Science. 2014. Iss. 4. P. 108–116.
4. Стефанік В.М. Комп'ютерно-інтегрована система управління перестановками ТВС в АКЗ ВВЕР-1000 с учетом поврежденности оболочек твэлов. Автоматизація технологічних і бізнес-процесів. 2016. Vol. 8, № 1. С. 83–89.
5. Пелых С.Н. Основы управления свойствами твэлов ВВЭР. Саарбрюккен, 2013. 160 с.
6. Бойко О.В., Пелих С.В. Розробка та дослідження автоматизованої системи управління режимом навантаження реакторної установки з ввер-1000 з врахуванням параметра деформаційного пошкодження оболонок твелів. Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2018. Том 29(68). № 4. С. 1–10.

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СВОЙСТВАМИ ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА ВВЭР-1000 ДЛЯ ПРОГРАММЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ МОЩНОСТИ РЕАКТОРА С ПОСТОЯННЫМ ДАВЛЕНИЕМ ПАРА ВТОРОГО КОНТУРА

Енергоблоки АЭС с реакторами ВВЭР-1000, которые эксплуатируются на четырех АЭС, являются самыми мощными на территории Украины. В связи с тем, что существует существенное несоответствие между выработкой и потреблением электрической энергии в энергосистеме страны в течение суток, а также в связи с тем, что суммарная доля установок, предназначенных для регулирования суточного графика нагрузки энергосистемы очень мала, становится актуальной адаптации действующих энергоблоков к новым специфическим условиям работы путем создания автоматизированной системы регулирования (АСР) мощности энергоблока, которая позволит эксплуатировать энергоблоки АЭС в маневренных режимах.

Ключевые слова: тепловыделяющие элементы (ТВЭЛ), атомная электростанция (АЭС), автоматизация, активная зона (АКЗ), режим маневрирования мощностью.

DEVELOPMENT AND INVESTIGATION OF THE AUTOMATED SYSTEM OF CONTROL OF VVER-1000 NUCLEAR FUEL PROPERTIES FOR THE PROGRAM OF REGULATION OF POWER OF A REACTOR WITH THE CONTINUOUS TISSUE OF SECONDARY CIRCUIT

The power units of the WVER-1000 reactors, which are operated at four nuclear power plants, are the most powerful in Ukraine. Due to the fact that there is a significant discrepancy between the generation and consumption of electric energy in the country's energy system during the day, as well as due to the fact that the total share of installations intended to regulate the daily load schedule of the power system is very small, adaptation becomes actual operating power units to the new specific operating conditions by creating an automated control system (ACS) of the power unit power that will allow the operation of power units of the NPP in maneuverable modes.

Key words: *heat-conducting element (HCE), nuclear power plant (NPP), automation, active zone(AZ), power maneuvering mode.*

УДК 004.4

Бородкіна І.Л.

Київський національний університет культури і мистецтв

Бородкін Г.О.

Національний університет біоресурсів і природокористування України

ІНФОРМАЦІЙНА ПІДТРИМКА МАРКЕТИНГОВОЇ ДІЯЛЬНОСТІ НА РИНКУ ВЕТЕРИНАРНОЇ ПРОДУКЦІЇ

У статті аналізуються питання, пов'язані з розробкою інформаційної системи, призначеної для підтримки маркетингової діяльності на ринку ветеринарної продукції. Досліджуються основні напрями маркетингової діяльності та інформаційні потоки, які при цьому виникають. Визначаються задачі, які має вирішувати інформаційна система, призначена для підтримки маркетингової діяльності. Розглядається загальна концепція побудови маркетингової інформаційної системи. Наводиться функціональна структура розробленої системи. Надаються результати моделювання системи засобами UML.

Ключові слова: маркетингова інформаційна система, ветеринарна продукція, клієнт-серверна архітектура, підтримка маркетингу.

Постановка проблеми. Сучасний етап розвитку та реформування економіки України характеризується як постійним підвищенням активності малих і великих підприємств на внутрішньому ринку, так і тенденціями її активної інтеграції у світову спільноту, інтенсифікацією розвитку нових форм бізнесу. В цих умовах об'єктивно зростає інтерес до вивчення проблеми розробки стратегії просування продукції для виробників України.

Маркетингова діяльність в Україні нині набуває дедалі більшого значення. Для її підтримки треба мати постійно оновлювану оперативну і достовірну маркетингову інформацію. Це може бути забезпечено шляхом використання інформаційних систем, які здатні щодня обслуговувати багатомільйонні транзакції. Саме тому питання, пов'язані з використанням новітніх інформаційних технологій із метою забезпечення зручної інформаційної підтримки маркетингової діяльності на внутрішньому і зовнішньому ринках для України є необхідними і актуальними. Одним із можливих шляхів вирішення цієї проблеми є створення відповідних маркетингових інформаційних систем.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Використання сучасних інформаційних технологій за умови інтенсивного розвитку ринкових відносин нині є суттєвим фактором ефективного управління і маркетингу [1; 2]. Дедалі частіше для відслідковування та аналізу інформаційних потоків із метою прогнозування та прийняття управлінських рішень використовуються сучасні

інформаційні технології та системи. Якщо інформаційна система вирішує задачі збирання, аналізу й обробки інформації, необхідної для підготовки та прийняття маркетингових рішень, перетворює отримані дані на інформацію, необхідну для маркетологів і керівників маркетингових служб, то така система належить до класу маркетингових інформаційних систем. Нині питанням вивчення різних аспектів створення та використання маркетингових інформаційних систем приділяється багато уваги. Серед актуальних варто зазначити такі питання:

- визначення ролі інформації в процесі прийняття рішень;
- обґрунтування потреби підприємств у маркетинговій інформації;
- вивчення ринку маркетингової інформації;
- розробка класифікації джерел маркетингової інформації;
- визначення можливих форм організації роботи з маркетинговою інформацією;
- обґрунтування методичного інструментарію створення і функціонування маркетингових інформаційних систем;
- визначення основних переваг від впровадження МІС;
- розробка методики використання інформаційних систем під час проведення підприємством маркетингової діяльності.

Незважаючи на розмаїття маркетингових систем, можна виділити такі їх складники (підсистеми): підсистема обробки з внутрішньої маркетингової інформації; підсистема збору зовнішньої

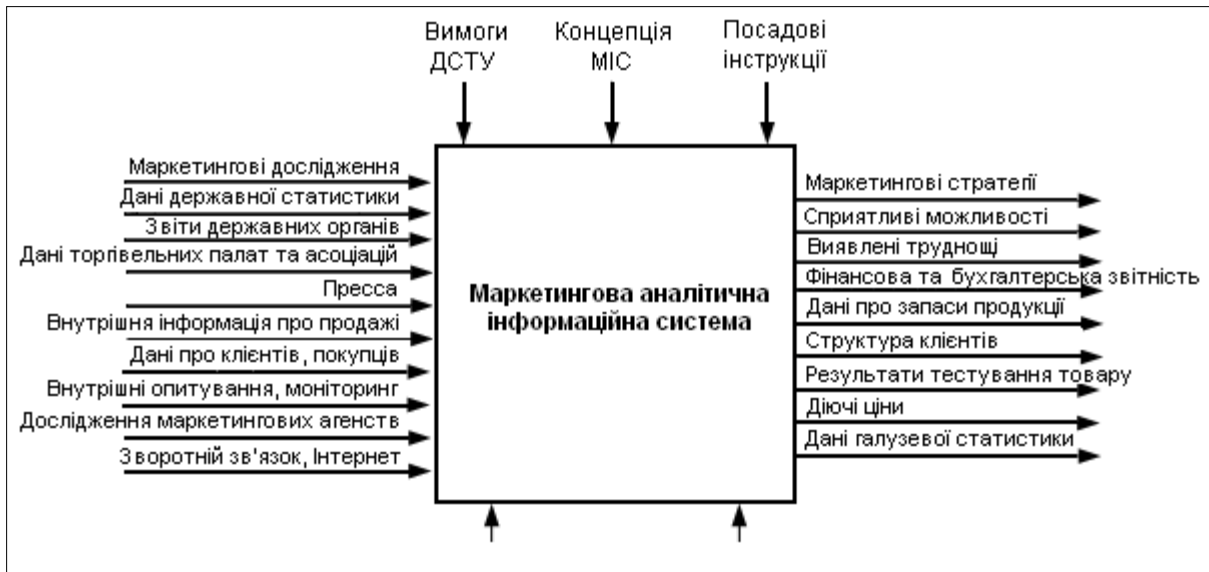


Рис. 1. SADT-діаграма контекстного рівня

поточної маркетингової інформації; підсистема маркетингових досліджень; підсистема аналізу маркетингової інформації. Варто зазначити, що призначення підсистем відповідає функціям, які має виконати маркетингова інформаційна система. Серед інформаційних джерел для таких систем можна виділити інформацію, вже наявну в інших системах підприємства, інформацію, що купується, та інформацію, що збирається самостійно. Опрацювання цієї інформації дає змогу ефективно вирішувати задачі оцінювання і моделювання рівня виконання планів і реалізації стратегій маркетингу на основі статистичного аналізу, оцінювання результатів впровадження стратегій і заходів маркетингової діяльності, виявлення сприятливих можливостей, труднощів і проблем [3–4]. Таким чином, маркетингова інформаційна система перетворює інформацію на відомості, необхідні керівникам структурних підрозділів компанії і фахівцям маркетингових служб із метою виявлення взаємозв'язків компанії з ринком і забезпечення відповідного і своєчасного реагування.

Постановка завдання. Необхідність підвищення якості маркетингових послуг у сфері реалізації ветеринарної продукції потребує розробки відповідної інформаційної системи, яка задовольнить інформаційні потреби менеджерів у маркетинговій інформації і дасть змогу використовувати її з метою планування, прогнозування, вирішення проблем і контролю діяльності підприємства. Ця система повинна мати функціонал, який дасть змогу аналізувати наявну інформацію, вивчати потреби, характеристики ринку та його потенціал, аналізувати збут товарів, вивчати тен-

денції ділової активності, товари конкурентів, надавати дорадчу інформацію та автоматизувати процеси товарно-збутової діяльності підприємства, здійснювати короткотермінове, середньотермінове та довготермінове прогнозування, досліджувати реакції ринку на новий товар, формувати політику цін і розподілу товарів.

Виклад основного матеріалу дослідження. З метою структурного аналізу і проектування інформаційної системи підтримки маркетингової діяльності на ринку ветеринарної продукції була застосована одна з найвідоміших методологій аналізу і проектування систем – SADT-технологія (SADT – Structured Analysis and Design Technique). Відповідно до цієї методології модель SADT відображає функціональну структуру об'єкта, тобто дії та зв'язки між цими діями. Внаслідок застосування методології SADT була побудована модель цієї інформаційної системи. На рис. 1 представлена SADT-діаграма контекстного рівня.

Більш розгорнуто основні процеси системи відображені на SADT-діаграмі нульового рівня (рис. 2).

На наступному етапі проектування системи була побудована діаграма потоків даних (data flow diagrams, DFD-діаграма), яка дала змогу відобразити потоки даних розроблюваної системи та візуалізувати процеси обробки цих даних. Під потоками даних у такому разі розумілись як матеріальні, так і інформаційні потоки. Матеріальні потоки – це сировина, допоміжні матеріали, продукти виробництва, обладнання, транспортні засоби тощо. Інформаційні потоки – це інформація про замовлення, дані про стан ринку, про

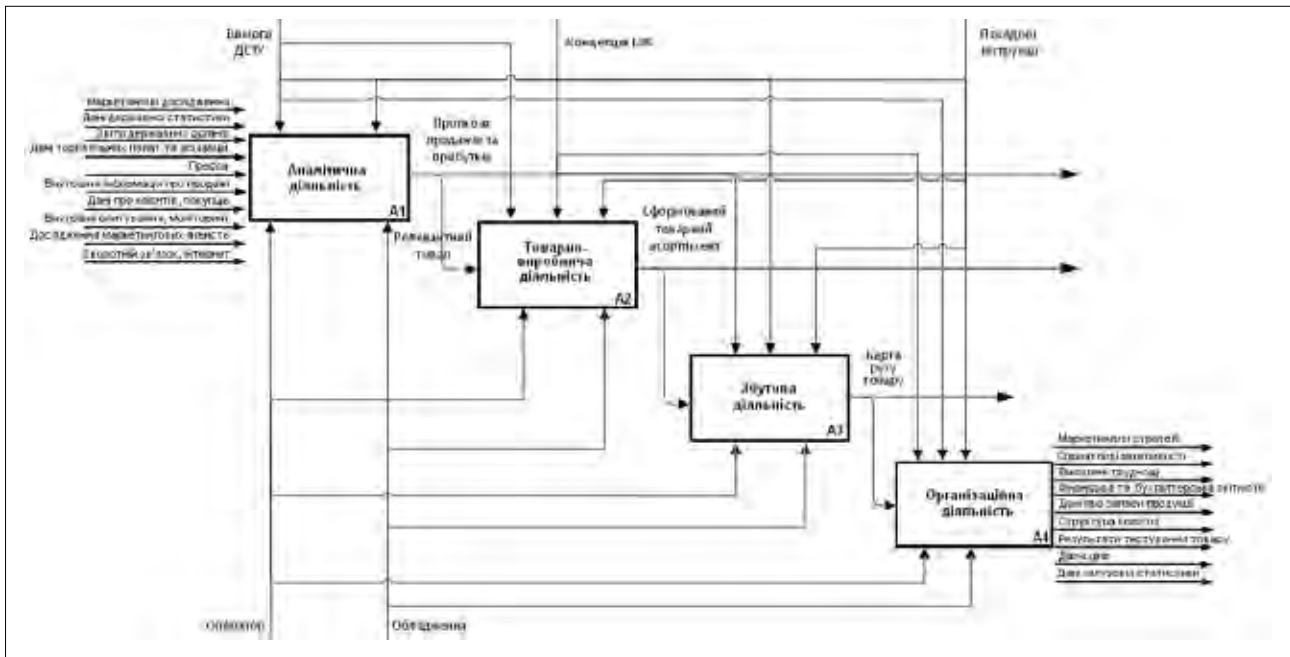


Рис. 2. SADT- діаграма нульового рівня



Рис. 3. Діаграма потоків даних системи

наявність сировини, запаси на складах, виконані роботи, вузькі місця у виробництві, виготовлену продукцію, інформація про вартість тощо.

Під час проектування системи використовувався загальноприйнятий стандарт графічного опису програмного забезпечення – мова UML (Unified Modeling Language). Повний перелік операцій (функцій), які може виконувати система, представлений на діаграмі прецедентів (рис. 4).

У системі передбачено виконання таких функцій: узагальнення вивченої інформації; залучення клієнтів і партнерів; аналіз ринку; внутрішній аудит маркетингу.

Для побудови внутрішньої архітектури системи було визначено загальні стандарти моделювання і документування системи, проведено формування основних абстракцій предметної області, проведено формування початкового уявлення архітектурних рівнів. Ідентифікація основних абстракцій

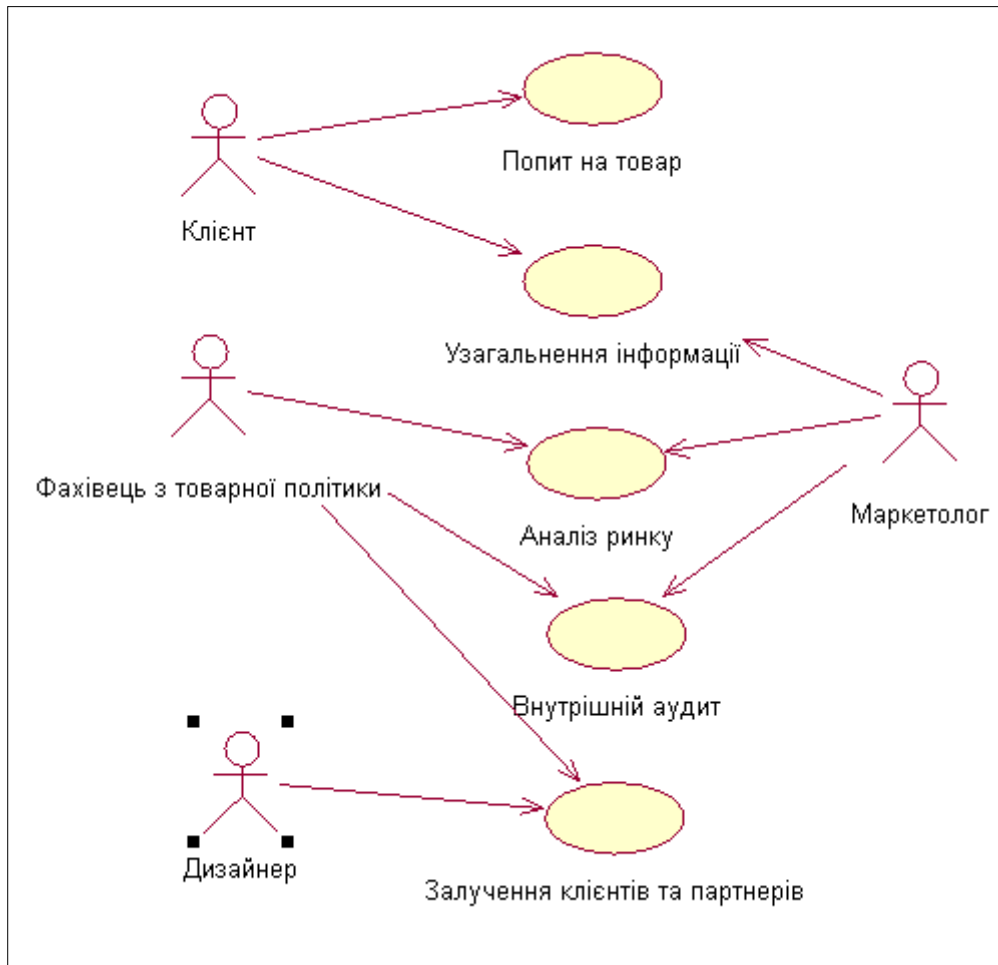


Рис. 4. Діаграма прецедентів

на основі опису предметної області і специфікацій вимог до системи дала змогу розробити схему даних системи. У цій схемі реалізовані такі сутності:

- клієнт – людина, яка хоче замовити ветеринарні препарати, ПІБ, стать, вік, адресу проживання та контактний телефон;
- товар – ветеринарні препарати, які мають категорію, ціну, артикул;
- постачальник – компанія, яка постачає ветеринарні препарати;
- склад – місце, де зберігаються ветеринарні препарати;
- маркетолог – менеджер, який проводить продажі та контролює базу даних;
- замовлення – вимога на придбання ветеринарної продукції;
- доставка – забезпечення покупця товаром за вказаною адресою.



Рис. 5. ER-діаграма системи підтримки маркетингової діяльності

Розроблена схема даних системи відображена на відповідній ER-діаграмі (рис. 5).

Із метою моделювання часових аспектів внутрішніх і зовнішніх протоколів роботи системи

використовувались діаграми послідовностей (sequence diagrams). Взаємодія об'єктів, впорядкована за часом їх прояву, показана на діаграмі послідовності розроблюваної системи (рис. 6). На цій діаграмі описана така послідовність дій: маркетолог аналізує ринок і займається оформленням реклами; клієнт замовляє продукцію; маркетолог обробляє замовлення; відбуваються оформлення договору та розробка маркетингового плану; замовлення доставляють клієнту.

Щоб проілюструвати дії, що виконуються в системі, були розроблені діаграми діяльності (рис. 7). Відповідно до неї маркетолог аналізує ринок, заохочує потенційних клієнтів. Клієнт вибирає продукцію, робить замовлення й оплачує його. Маркетинговий відділ оформляє договір, готує замовлення, узгоджує замовлення з клієнтом, передає замовлення комерційного відділу.

Висновки. Розробка інформаційних систем для підтримки маркетингової діяльності підприємств різних галузей є порівняно новим і перспективним напрямом розвитку інформаційних і телекомунікаційних технологій, який забезпечує оперативний доступ до маркетингової інформації організації з метою подальшого її аналізу для визначення потреб та характеристик ринку, аналізу збуту товарів, вивчення тенденцій ділової активності, товарів конкурентів, надання дорадчої інформації та автоматизації процесів товарно-збутової діяльності підприємства, здійснення короткотермінового, середньотермінового та довготермінового прогнозування, дослідження реакції ринку на новий товар, формування політики цін і розподілу товарів.

Розроблена маркетингова інформаційна система призначається для підтримки маркетингової діяльності на ринку ветеринарної продукції. Вона повністю відповідає сформульованим вимогам

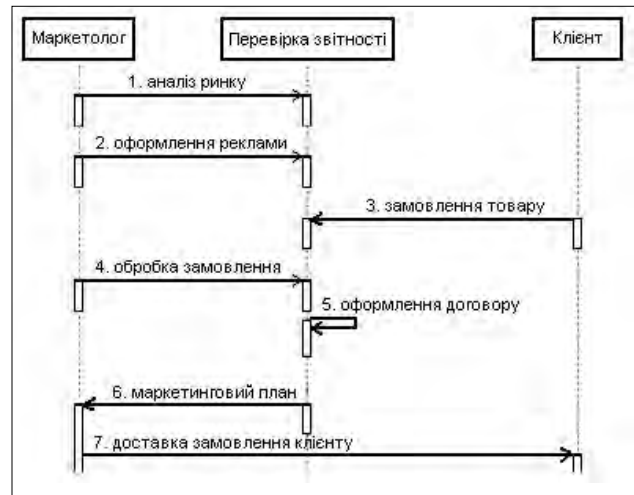


Рис. 6. Діаграма послідовностей для обслуговування замовлення в системі

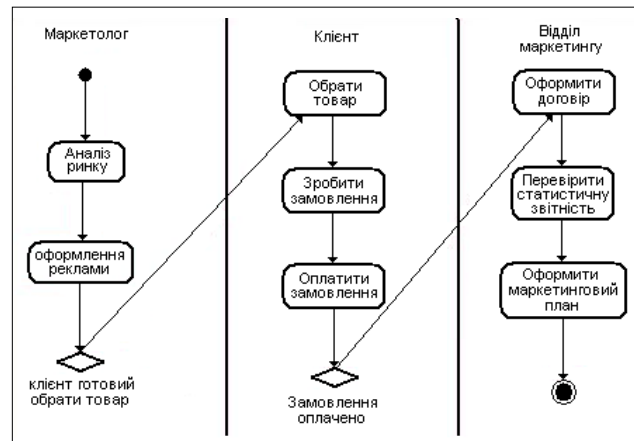


Рис. 7. Діаграма діяльності

та надає фахівцям із маркетингу допомогу у прийнятті комерційно виважених рішень, що призводить до зниження витрат і отримання додаткового прибутку.

Список літератури:

1. Котлер Ф. Основы маркетинга. Краткий курс. Издательство «Вильямс», 2007. 656 с.
2. Jari M. Talvinen. Information systems in marketing: Identifying opportunities for new applications. European Journal of Marketing. 1995. Vol. 29. No. 1. P. 10.
3. Chandra S.A., Subhashish S., Siddhartha D. Intelligent marketing information systems: computerized intelligence for marketing decision making. Marketing Intelligence & Planning. 1995. Vol. 13. No. 2. P. 4.
4. George M. Giaglis, Nikolaos Mylonopoulos and Georgios I. Doukidis. The ISSUE methodology for quantifying benefits from information systems. Logistics Information Management. 1999. Vol. 12. No. 1, 2. Pp. 50–62.

ИНФОРМАЦИОННАЯ ПОДДЕРЖКА МАРКЕТИНГОВОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ НА РЫНКЕ ВЕТЕРИНАРНОГО ПРОИЗВОДСТВА

В статье анализируются вопросы, связанные с разработкой информационной системы, предназначенной для поддержки маркетинговой деятельности на рынке ветеринарной продукции. Исследуются основные направления маркетинговой деятельности и информационные потоки, возникающие при этом. Определяются задачи, которые должна решать информационная система, предназначенная для поддержки маркетинговой деятельности. Рассматривается общая концепция построения

маркетинговой информационной системы. Приводится функциональная структура разработанной системы. Представлены результаты моделирования системы средствами UML.

***Ключевые слова:** маркетинговая информационная система, ветеринарная продукция, клиент-серверная архитектура, поддержка маркетинга.*

INFORMATION SUPPORT FOR MARKETING ACTIVITIES ON THE MARKET OF VETERINARY PRODUCTS

The article analyzes the issues related to the development of an information system designed to support marketing activities in the veterinary market. The main areas of marketing activity and information flows that are emerging are investigated. The tasks, which must be solved by an information system designed to support marketing activities, are determined. The general concept of building a marketing information system is considered. The functional structure of the developed system is presented. The UML modeling results are provided.

***Key words:** marketing information system, veterinary products, client-server architecture, marketing support.*

УДК 543.421:621.38

Вербицкий В.Г.

Запорожская государственная инженерная академия

Полякова Н.П.

Запорожская государственная инженерная академия

Татиевский Д.Н.

Запорожская государственная инженерная академия

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ УПРАВЛЯЕМОГО ДВИЖЕНИЯ АВТОПОЕЗДА ВДОЛЬ ПРОГРАММНОЙ КРИВОЙ

В статье рассмотрена возможность реализации управляемого движения седельного автопоезда (тягача с прицепом) по программной траектории, задаваемой в явном, неявном, параметрическом виде или законом изменения ее кривизны. При этом угол поворота управляемого колесного модуля является функцией кривизны программной траектории и текущих фазовых переменных модели сочлененного экипажа. Исследована возможность движения автопоезда в заданном коридоре и вычислена минимально допустимая ширина такого коридора. Также реализован процесс проектирования траектории в виде кусочно-непрерывной функции. Особое значение в исследовании уделено реализации управления по типичным практическим маневрам водителя автопоезда: переставка (обгон), задаваемая в виде двух арктангенсоид, поворот на 90 градусов, движение по дуге клотоида. Для маневра поворот на 90 градусов исследована зависимость управления и угла складывания от скорости движения автопоезда. Важной особенностью исследования явилась разработка программного обеспечения, позволившего выполнить наглядную визуализацию маневров движения в системе Unity 3D.

Ключевые слова: программная траектория, курсовой угол, кривизна кривой, динамический коридор, эквидистанта, клотоида.

Постановка проблемы. В реальных условиях водителю автопоезда приходится довольно часто маневрировать в ограниченной дорожной обстановке. Автопоезд должен иметь возможность изменять направление движения. Это необходимо при маневрировании в местах погрузки и разгрузки на небольшой площади, на городских дорогах, характеризующихся большим количеством поворотов. Иногда возникает необходимость движения задним ходом или потребность в полном развороте на ограниченной площади. Поэтому важно, владея информацией о форме безопасного коридора для движения, реализовать траекторию движения автопоезда, приближенную при данных условиях к теоретической. При этом необходимо решить задачу о возможности движения автопоезда внутри такого коридора и вычислить его минимально допустимую ширину.

Траектория маневрирования может быть представлена совокупностью криволинейных участков, которые можно аппроксимировать, например, простейшими переходными кривыми. Развитие компьютерных технологий упрощает процесс графического построения программных траекторий.

При исследовании динамики плоскопараллельного движения автопоезда немаловажным аспектом является синтез управления (закон управления колесным модулем) для обеспечения безопасного движения, близкого к программной траектории, что требует построения алгоритма и способов формирования управляющих воздействий на колесный модуль. Задача реализации синтеза управления является актуальной в теории и практике любых колесных экипажей в виду стремительного развития электронных систем управления.

Анализ последних исследований и публикаций. В работах В.Г. Вербицкого, В.И. Павлюка рассмотрена реализация закона управления автомобилем на основе информации о геометрических характеристиках (кривизны траектории или закона изменения курсового угла) программной кривой. Тот факт, что любой функции управления соответствует единственная траектория движения автомобиля, задаваемая уравнением кривизны траектории, и наоборот, любой гладкой траектории движения автомобиля соответствует единственная функция управления, установлен в исследованиях Ф.Д. Мисюры и Е.А. Митюшова [1; 2; 3].

Для отдельного автомобиля с параметрически задаваемой траекторией движения его центра масс закон управления реализован в работе С.А. Берестова, Н.Е. Мисюры и Е.А. Митюшова. Для параметрически и неявно заданной траектории движения трехколесного робота синтез управления выполнен в исследованиях Е.В. Письменной [4; 5].

Также известны подходы, использующие управление с обратной связью (PID-контроль). В работе Дж. Чжун рассматривается подход к задачам маневрирования и синтезу соответствующего управления, аналогичный работе В.Г. Вербицкого, применительно к автопоезду, а не к отдельному автомобилю [1; 6].

Формирование цели статьи (постановка задачи). Реализовать аналитический синтез управления движением автопоезда, кинематика и динамика которого описывается нелинейными дифференциальными уравнениями неголономной механики. Синтез выполнен с учетом требований к качеству процесса движения автопоезда по программируемой траектории – по ее геометрическим характеристикам (по известному закону изменения курсового угла программной траектории). Цель статьи – исследование возможности прохождения программируемой траектории в заданном коридоре и вычисление его минимальной ширины, необходимой для такого прохождения.

Изложение основного материала исследования. Рассматривается плоская велосипедная модель движения автопоезда [7]. Схема сочлененного экипажа приведена на рисунке 1, здесь v – продольная составляющая центра масс тягача; θ – угол поворота управляемого модуля; a , b – расстояние от центра масс тягача до центров передней (управляемой) оси и задней оси тягача; c – расстояние от центра масс тягача до точки сцепки со вторым звеном; d_1 – расстояние от центра масс второго звена до точки сцепки с тягачом; Y_i – силы увода на осях, коэффициенты сопротивления уводу на осях (k_1 ; k_2 ; k_3); m – масса тягача; u – поперечная проекция вектора скорости центра масс тягача; ω – угловая скорость тягача относительно вертикальной оси; m_2 – масса второго звена; v_1 , u_1 – продольная и поперечная проекции вектора скорости центра масс полуприцепа; φ – угол складывания (угол между продольной осью тягача и полуприцепа).

Модель учитывает воздействие линейных боковых сил увода Y_i , которые согласно аксиоматике Рокара определяются соотношением: $Y_i = k_i \cdot \delta_i (i = 1, 2, 3)$, где $\delta_i (i = 1, 2, 3)$ – углы увода (приведенные) на осях.

В системе Maple выражения для динамических уравнений записаны в виде:

$$\begin{aligned} e_1 &:= -m * (U + \omega * v) + Y_1 + \cos(\phi) * Y_3 - 2 * m_2 * \sin(\phi) * \omega * d_1 * \\ & \quad \phi + m_2 * \sin(\phi) * d_1 * \phi^2 + m_2 \cos(\phi) * \\ & \quad * d_1 * \omega - m_2 \cos(\phi) * d_1 * PP \\ & \quad + m_2 * \sin(\phi) * d_1 * \omega^2 + Y_2 - m_2 * \\ & \quad * U + m_2 * c * \omega - m_2 \omega * v; \\ e_2 &:= c * m_2 * \omega * v - b * Y_2 - J * \\ & \quad * \omega + c * m_2 \cos(\phi) * d_1 * PP - c * m_2 \sin(\phi) * \\ & \quad * d_1 * \phi^2 - c * m_2 \cos(\phi) * d_1 * \\ & \quad * \omega + a * Y_1 * m_2 * U - m_2 c^2 * \omega - c * \\ & \quad \cos(\phi) * Y_3 - c * m_2 \sin(\phi) * d_1 * \\ & \quad * \omega^2 + 2 * c * m_2 \sin(\phi) * \omega * d_1 * \phi; \\ e_3 &:= -J_2(\omega - PP) - L_1 * Y_3 + d_1 * \cos(\phi) * \\ & \quad * m_2 * U + d_1 * \cos(\phi) * m_2 * v - d_1 * \\ & \quad \sin(\phi) * m_2 \omega * u - d_1^2 * m_2 * \\ & \quad * \omega + d_1^2 * m_2 * PP - c * m_2 * \cos(\phi) * d_1 * \\ & \quad \omega + c * m_2 \sin(\phi) * d_1 \omega^2. \end{aligned}$$

В этих выражениях (система дифференциальных уравнений движения): U – производная боковой составляющей центра масс, ω – производная угловой скорости (ω) относительно вертикальной оси, ϕ – скорость изменения угла поворота (ϕ) заднего звена; PP – угловое ускорение заднего звена.

Вычислив якобиан системы J_{oo} , получим характеристическое уравнение:

$$chp := \text{linalg}[\text{charpoly}](J_{oo}, \lambda);$$

и его корни:

$$eigv := \text{evalf}(\text{solve}(chp, \lambda)).$$

Приложение определяет момент появления корня с неотрицательной действительной частью при варьировании значения скорости.

При этом управление θ , которое входит в уравнение (1):

$$\delta_1 = \theta - \frac{u + a\omega}{v}, \quad (1)$$

вычислено в символьном виде в системе Maple.

1. Движение по программной траектории. Изменения декартовых координат центра масс и курсового угла определяются кинематическими уравнениями:

$$\begin{aligned} \dot{x}_c &= v * \cos \psi - u * \sin \psi; \\ \dot{y}_c &= v * \sin \psi - u * \cos \psi; \\ \dot{\psi} &= \omega. \end{aligned} \quad (2)$$

Система дифференциальных уравнений, определяющая программную траекторию, имеет вид:

$$\begin{aligned} \dot{\psi} &= \dot{\psi}(t); \\ \dot{x} &= v * \cos \psi; \\ \dot{y} &= v * \sin \psi. \end{aligned} \quad (3)$$

В этих уравнениях ψ – курсовой угол, скорость изменения связана с кривизной траектории соотно-

шением $\psi = Kr * v$, где кривизна Kr для явно или параметрически заданной кривой вычисляется по известным формулам дифференциальной геометрии.

Закон изменения угла поворота колесного модуля определяется из равенства радиусов кривизны реальной и теоретической кривых. Для вычисления кривизны реальной траектории $Kr = 1 / \rho_c$ воспользуемся формулой (4) [1]:

$$\frac{1}{\rho_c} = \frac{V_c^2 \omega}{V_c^2 \sqrt{u^2 + v^2}} + \frac{iv}{V_c^2 \sqrt{u^2 + v^2}} = \frac{\omega}{\sqrt{u^2 + v^2}} + \frac{iv}{\sqrt{(u^2 + v^2)^3}} \quad (4)$$

В этом случае угол поворота управляемого колесного модуля является функцией кривизны программной траектории и текущих фазовых переменных модели автопоезда. В системе Maple находится как результат решения уравнения:

$$\text{theta} := \text{solve}(\text{omega} / \text{sqrt}(u^2 + v^2) + U * v / \text{sqrt}(u^2 + v^2)^3 = Kr, \text{theta}),$$

где U – производная боковой составляющей скорости центра масс.

Таким образом, для управления движением по заданной траектории используется ее кривизна $Kr = \frac{\psi}{v}$. Угол поворота управляемого колесного модуля θ является функцией кривизны программной траектории и текущих фазовых переменных модели.

Задаем значения констант, начальные значения переменных модели движения автопоезда и программируемой кривой, а также закон изменения курсового угла $\psi(t) = 0.3 * \sin(t)$ («змейка»):

$$\begin{aligned} g &= 9.81 \text{ м} / \text{с}^2; a = 3.376 \text{ м}; b = 4.217 \text{ м}; b_1 = \\ &= 8.075 \text{ м}; c = 3.376 \text{ м}; m = 6417 \text{ кг}; m_2 = 41846 \text{ кг}; \\ k_1 &= 300000 \text{ Н} / \text{рад}; k_2 = 300000 \text{ Н} / \text{рад}; k_3 = \\ &= 300000 \text{ Н} / \text{рад}; \text{kappa}1 = 0.8; \text{kappa}2 = 0.8; \\ \text{kappa}3 &= 0.8; \text{theta} = 0; \text{phi}(0) = -0.2 \text{ рад}; v = \\ &= 5 \text{ м} / \text{с}; KOL = 2.2 \text{ м}; \text{kappa} = 1.7. \end{aligned}$$

Численное интегрирование системы дифференциальных уравнений в среде Maple дает возможность сопоставить реальную и программную траектории (рис. 2).

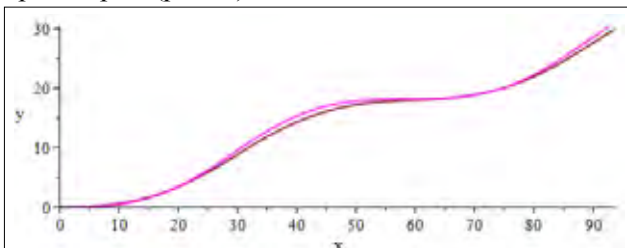


Рис. 2. Реальная и программная траектории

При этом тягач и прицеп будут двигаться по траекториям, показанным на рис. 3 (траектория тягача изображена красным).

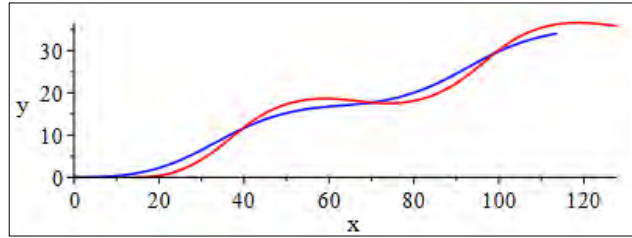


Рис. 3. Траектории движения тягача и прицепа

Следовательно, задавая программную траекторию движения некоторой явной функцией $y = f(x)$ или параметрически $\{x = x(t), y = y(t)\}$, в частности $\{x = t, y = f(t)\}$, закон изменения курсового угла (из геометрического смысла производной) $\psi = \text{arctg}(y')$. Скорость изменения курсового угла составит:

$$\dot{\psi} = \frac{vy''_{xx}}{(1 + (y'_x)^2)^{3/2}} \quad (5)$$

для заданной явно функции или при параметрическом ее задании:

$$\dot{\psi} = v * \frac{|x'y'' - y'x''|}{[(x')^2 + (y')^2]^{3/2}} \quad (6)$$

Отметим, что при движении по траектории, заданной как функция координат, необходимо соблюдение условия монотонности изменения аргумента функции. Однако существуют траектории, содержащие петли, тогда это условие не будет выполняться. В этом случае необходимо траекторию задавать исключительно в параметрическом виде.

После подстановки в систему (3) и ее численного интегрирования получается кривая, совпадающая с программной траекторией (рис. 2).

По результатам численного интегрирования получаем дискретные наборы координат траекторий движения тягача и прицепа, углов поворота рулевых колес и углов складывания, для моделирования движения в системе Unity 3D и для управления робототехнической установкой. На рис. 4 представлен фрагмент моделирования при движении «по змейке».

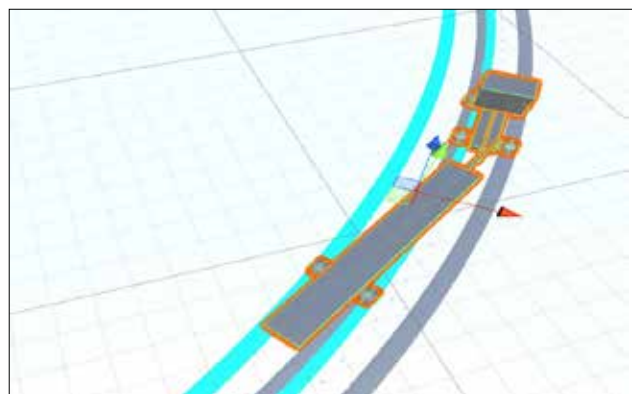


Рис. 4. Фрагмент результатов моделирования в системе Unity 3D

Для автоматизации процесса исследования возможности движения автопоезда по программируемой траектории разработано приложение на языке C#, позволяющее выполнять автоматизированный сценарий на языке Maple с помощью технологии Open Maple API. Что позволяет в явном виде задавать скорость изменения курсового угла или траекторию в параметрическом виде.

Исследуем возможность программного движения по дуге клотоиды (кривая, у которой кривизна изменяется линейно как функция длины дуги, имеет значение в качестве переходной кривой). Клотоида в силу линейного характера графика ее кривизны является самой короткой переходной кривой, обеспечивающей непрерывность функции кривизны с минимально возможным для этой длины темпом изменения, соответственно, и с минимальной скоростью нарастания центробежной силы при постоянной скорости движения на ней. Все другие кривые, равные клотоиде по экстремальному для этих кривых значению темпа нарастания кривизны, будут либо длиннее клотоиды, либо будут иметь участки с большим, чем у клотоиды, темпом изменения кривизны и, соответственно, с большей скоростью нарастания центробежной силы для той же постоянной скорости движения, что и по клотоиде.

Параметрически клотоида может быть представлена через интегралы Френеля:

$$\vec{r}(t) = (aC(t), aS(t)).$$

Интегралы Френеля $S(u)$ и $C(u)$ – это специальные функции:

$$S(t) = \int \sin(u^2) du, \quad C(t) = \int \cos(u^2) du.$$

В соответствующие поля приложения введем аналитические выражения (на внутреннем языке Maple):

$$\begin{aligned} X(t) &:= 200 * (\text{int}(\cos((1/2) * Pi * u^2), u = 0..t)); \\ Y(t) &:= 200 * (\text{int}(\sin((1/2) * Pi * u^2), u = 0..t)). \end{aligned} \quad (7)$$

В ходе выполнения сценария получаем необходимые фазовые портреты с генерированием необходимой информации для моделирования в системе Unity 3D (рис. 5).

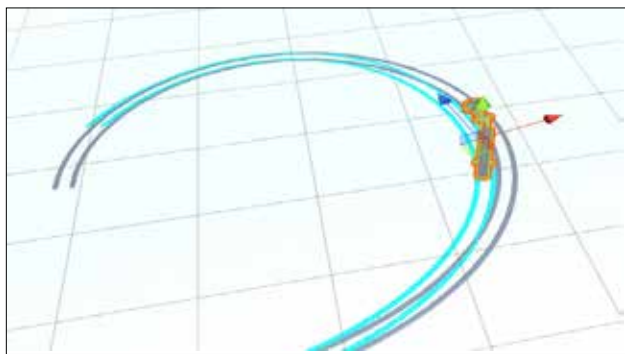


Рис. 5. Моделирование движения по дуге клотоиды

Для маневра «поворот на 90 градусов» исследована зависимость управления от скорости движения автопоезда (рис. 6).

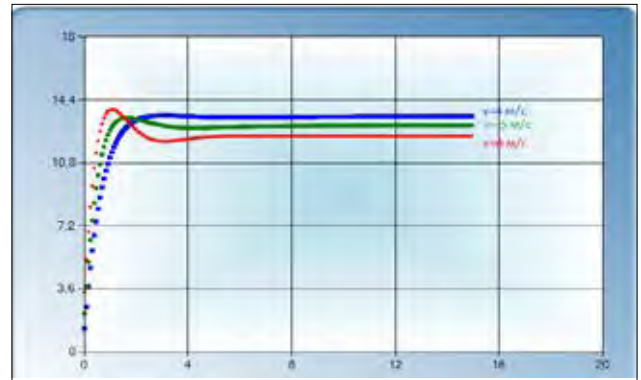


Рис. 6. Зависимость управления от скорости движения

Следует отметить, что приведенная тенденция уменьшения управления не носит абсолютного характера и соответствует приведенным выше параметрам модели. Изменив характер поворачиваемости автопоезда путем уменьшения параметра $m_2=5000$ кг, наблюдаем противоположную тенденцию (рис. 7).

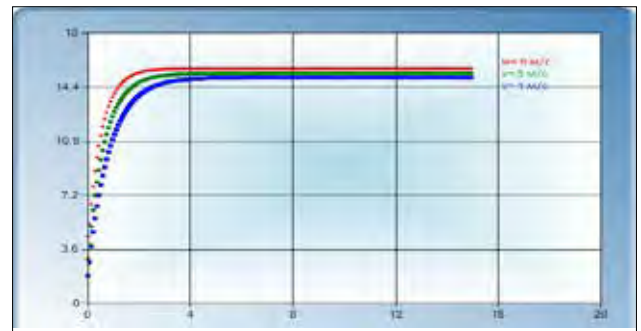


Рис. 7. Зависимость управления от скорости движения (недостаточная поворачиваемость)

Зависимость угла складывания от скорости движения изображена на рис. 8, тенденция отражает факт выброса прицепа во внешнюю сторону поворота при возрастании скорости автопоезда.

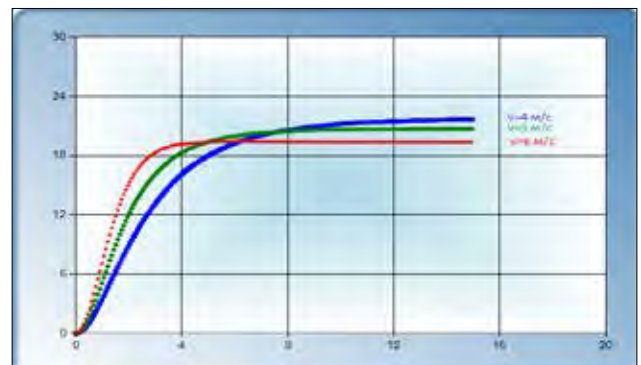


Рис. 8. Зависимость угла складывания от скорости движения

Необходимо отметить, что для чисто кинематических моделей эти тенденции не выражены и имеет место абсолютное приближение исследованных параметров к соответствующим асимптотам [8].

2. Возможности движения в заданном коридоре. Пусть W – желаемая ширина коридора, вокруг программной траектории строим две эквидистанты на расстояниях $h = \pm W / 2$ по известным формулам дифференциальной геометрии.

В случае аналитического задания траектории:

$$x = \zeta(t), y = \eta(t) \forall t \in [a, b];$$

$$x = \xi \pm \frac{h \cdot \eta'}{((\zeta')^2 + (\eta')^2)^{1/2}} ;$$

$$y = \eta \mp \frac{h \cdot \zeta'}{((\zeta')^2 + (\eta')^2)^{1/2}} .$$

При дискретном ее представлении (по результатам численного интегрирования) используем формулы (8) [9]:

$$\begin{aligned} x &= x_0 \pm h \cdot \sin(\alpha); \\ y &= y_0 \mp h \cdot \cos(\alpha). \end{aligned} \quad (8)$$

где α – угол наклона касательной в точке (x_0, y_0) основного контура;

$\tan(\alpha) = dy / dx$ – отношение приращения координат;

(x, y) – координаты эквидистант.

Гарантированное прохождение внутри программного коридора контролируется проверкой нахождения внутри него пары эквидистант, обрамляющих реальную траекторию и отстоящих от нее на расстоянии $\pm D / 2$, где D – максимальный габаритный (динамический) коридор автопоезда, который вычисляется с учетом ширины кузова автопоезда и смещения прицепа. Таким образом, динамический коридор рассматривается как полоса движения автопоезда. На прямолинейных участках она равна ширине кузова автопоезда W_b , на криволинейных участках – ширине кузова автопоезда плюс величина h_b – смещение прицепа (полуприцепа).

На рис. 4 можно видеть, что наибольшей величины динамический коридор достигает в середине поворота и определяется как разность наружного и внутреннего радиусов поворота.

Случаи прохождения или непрохождения программного коридора контролируются программно приложением, фрагмент которого показан на рис. 9.

Следует отметить, что на возможность успешного прохождения оказывает влияние не только габаритная ширина автопоезда, но и степень отклонения реальной траектории от программной.

Эта же задача решена в контексте вычисления минимально допустимой ширины динамического коридора, для чего реальная траектория обрамляется эквидистантами переменной ширины $l_i = \pm(h_i + W_b) / 2$, рассчитываемой для дискретного набора радиусов кривизны (рис. 10). Смещение h_i вычисляется с учетом отклонения траектории тягача (красным) и прицепа (синим) от средней линии (магента).

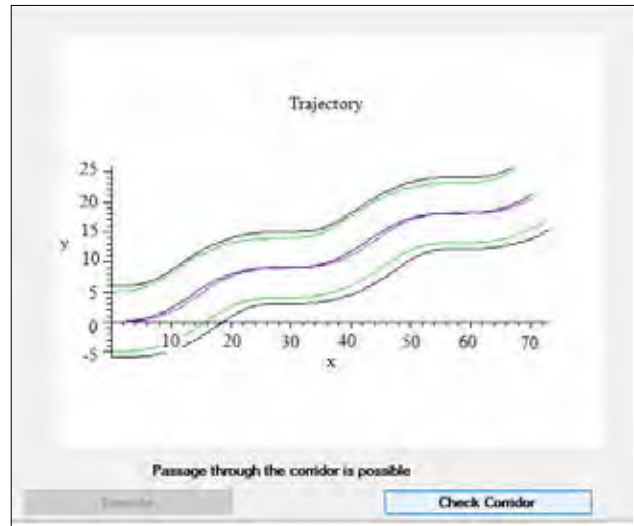


Рис. 9. Возможность прохождения в заданном коридоре

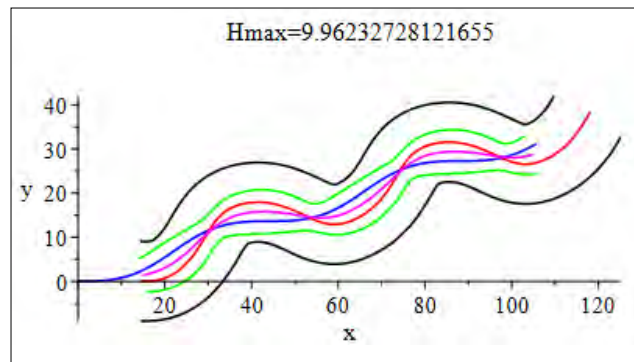


Рис. 10. Вычисление минимально допустимой ширины динамического коридора

Максимальная ширина такой эквидистанты (зеленым) будет равна минимальной ширине искомого коридора $h_{\min} = \max(l_i)$.

Для прямолинейного и кругового движения ширина коридора будет постоянной в силу постоянности радиусов траекторий (рис. 11, рис. 12).

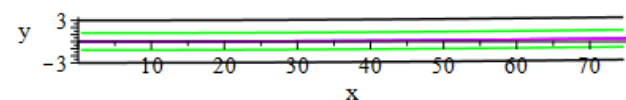


Рис. 11. Динамический коридор при прямолинейном движении

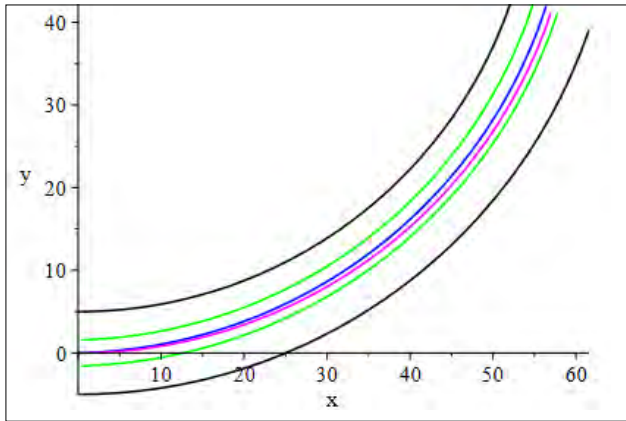


Рис. 12. Динамический коридор при движении по окружности

На рис. 13 представлено движение по дуге клотоиды, заданной приведенными выше соотношениями (8).

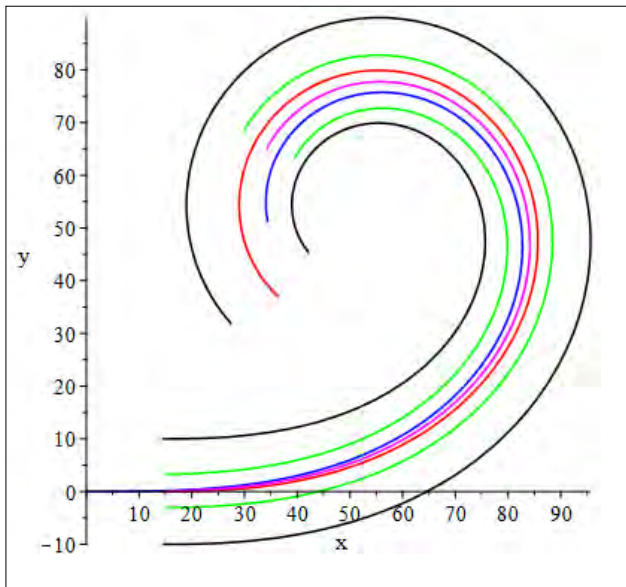


Рис. 13. Динамический коридор при движении по клотоиде

При этом следует иметь в виду, что минимальная ширина этого коридора будет зависеть от скорости в силу описанных выше исследований по углу складывания (рис. 14 и рис. 15).

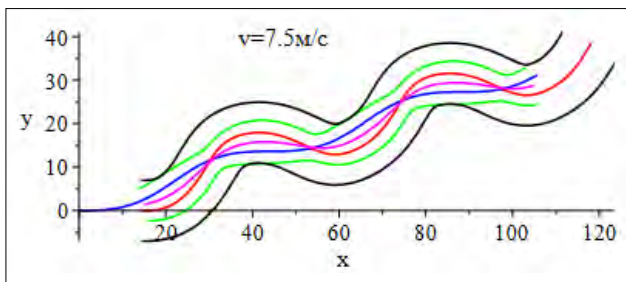


Рис. 14. Непрохождение коридора при скорости 7,5 м/с

Однако этот же коридор проходим на более высокой скорости.

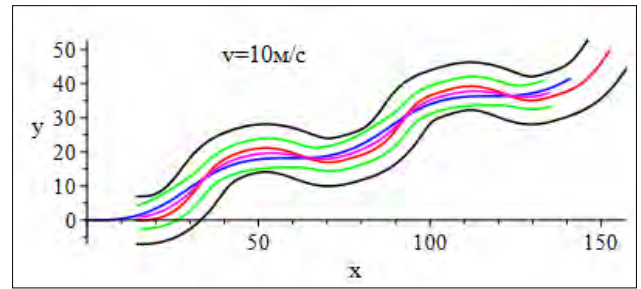


Рис. 15. Прохождение коридора на скорости 10 м/с

На всех приведенных выше рисунках черные эквидистанты обрамляют желаемый коридор, зеленые – реальный, вычисленный с учетом габаритов автопоезда и смещения прицепа.

На рис. 16 представлен фрагмент моделирования движения автопоезда внутри желаемого коридора в среде Unity 3D.

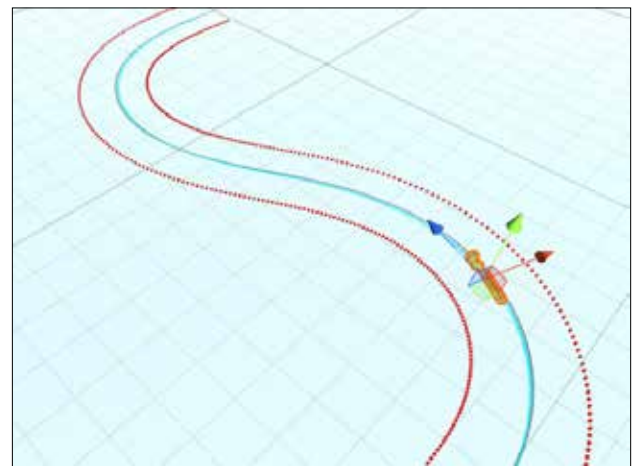


Рис. 16. Движение автопоезда по заданному коридору

3. Возможности реализации движения по траектории, заданной кусочно-непрерывной функцией. В приложении такая возможность реализована в виде выполнения сценария, записанного в соответствующий файл. При этом для первого участка траектории задаются условия Коши в виде начальных координат, для последующих сегментов эти условия представляют собой конечное состояние предыдущих. Также задается формула траектории явным ее представлением, неявно – параметрически или кривизной, а также время движения по этой траектории.

На рис. 17 представлено движение по стадиону по траектории, заданной двумя прямолинейными участками и двумя полуокружностями.

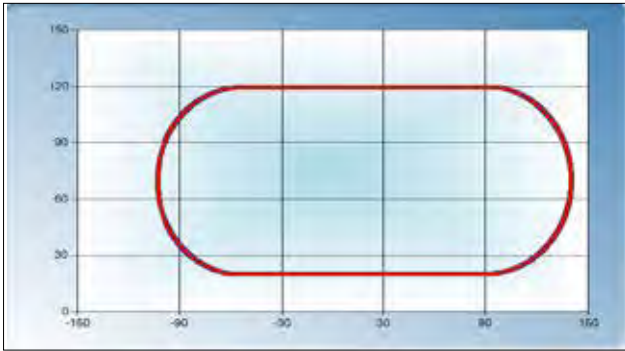


Рис. 17. Движение автопоезда по стадиону

Траектория в виде комбинации двух переставок (обгон), заданных арктангенсоидами, изображена на рис. 18.

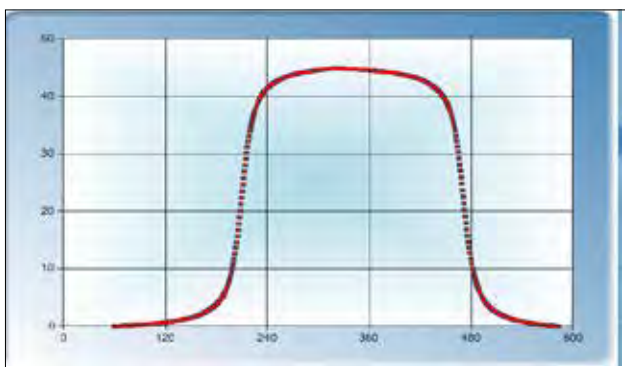


Рис. 18. Маневр «обгон»

Для траектории, спроектированной в виде кусочно-непрерывной функции, реализована возможность выполнить ее сглаживание с помощью клотоидной вставки – переходной кривой,

заданной уравнением (8), с учетом возможности ее смещения и поворота. Данная кривая обладает уникальным свойством – кривизна ее линейно увеличивается при увеличении ее длины, что на практике означает линейное (во времени) увеличение центростремительного ускорения при постоянной скорости движения автопоезда, и, следовательно, является оптимальным режимом для его движения.

Выводы. Таким образом, приходим к выводу, что по известному закону изменения курсового угла можно получить траекторию движения автопоезда. То есть можно осуществлять управляемое движение автопоезда по некоторой заданной траектории и прогнозировать возможности его движения в коридоре требуемой ширины. Также возможно вычислить минимально допустимую ширину такого динамического коридора. При этом программная траектория может быть задана явно, неявно, параметрически или законом изменения своей кривизны.

Результаты исследований моделировались в системе Unity 3D и могут быть использованы напрямую для управления соответствующей робототехнической установкой, обеспечив ее движение по программируемой траектории в заданном коридоре.

В дальнейшем планируется серия экспериментов со специально разрабатываемой робототехнической установкой и интегрирование разработанного механизма клотоидного сглаживания в процесс проектирования кусочно-непрерывной траектории.

Список литературы:

1. Вербицкий В.Г., Банников В.А., Червякова Е.В., Белевцова Н.Л. К вопросу реализации управляемого движения вдоль программной кривой. Вісник Донецької академії автомобільного транспорту. 2012. № 3. С. 67–73. URL: http://www.diat.edu.ua/journal/files/2012/3_2012.pdf
2. Павлюк В.І. Моделювання неусталеного криволінійного руху автомобіля. Наукові нотатки. Луцьк ЛНТУ. 2010. № 28. С. 374–379.
3. Мисюра Ф.Д., Митюшов Е.А. Расчет формы траектории транспортного средства и принцип рулевого управления Аккермана. Винчестерский колледж, Великобритания, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина». Екатеринбург, Россия. URL: <https://www.scienceforum.ru/2015/pdf/15215.pdf>
4. Берестова С.А., Мисюра Н.Е., Митюшов Е.А. Кинематическое управление движением колесных транспортных средств. Вестник Удмуртского университета. Математика. Механика. Компьютерные науки. 2015. № 2. С. 254–266. URL: <http://www.mathnet.ru/links/00c7a350bc696abbc8487af24b20e556/vuu482.pdf>
5. Письменная Е.В. Алгоритмы управления движением мобильного робота по заданным траекториям. Новые технологии, Мехатроника, автоматизация, управление. 2013. № 3. С. 16–23. URL: http://novtex.ru/mech/mech2013/Mh313_web.pdf
6. Zhong J. PID Controller Tuning: a short tutorial. Mechanical Engineering, Purdue University. 2006. P. 16. URL: <https://cdn.instructables.com/ORIG/FC1/NAZC/IVA51KF1/FC1NAZCIVA51KF1.pdf>
7. Verbitsky V., Bezverkhyi A., Tatievskiy D., Handling Analysis and Defining Conditions of Dangerous-Sfe Divergent Stability Loss of a Two-Link Road Train Nonlinear Model. Mathematical Modelling and Applications.

2018. Vol. 3. № 2. P. 31–38. URL: <http://www.sciencepublishinggroup.com/journal/paperinfo?journalid=247&doi=10.11648/j.mcs.20180301.13>

8. Tatievskiy D. Synthesis of the laws governing the non-holonomic model of a two-link road train with reverse motion (off-axle hitching model). Eureka: Physics and Engineering. 2018. № 2. P. 40–51. URL: <http://eu-jr.eu/engineering/article/view/592/601>

9. Ерохин В.В. Реализация геометрической задачи в станках с ЧПУ. Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2017. № 2. С. 135–141. URL: <http://ntv-brgu.ru/wp-content/arhiv/2017-N2/2017-02-02.pdf>

ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТІ РЕАЛІЗАЦІЇ КЕРОВАНОГО РУХУ АВТОПОЇЗДА ВЗДОВЖ ПРОГРАМНОЇ КРИВОЇ

У статті розглянута можливість реалізації керованого руху сидельного автопоїзда (тягача з причепом) з програмної траєкторії, що задається в явному, неявному, параметричному вигляді або законом зміни її кривизни. При цьому кут повороту керованого колісного модуля є функцією кривизни програмної траєкторії і поточних фазових змінних моделі зчленованого екіпажу. Досліджено можливість руху автопоїзда в заданому коридорі і обчислена мінімально допустима ширина такого коридору. Також реалізований процес проектування траєкторії у вигляді кусково-неперервної функції. Особливе значення в дослідженні присвячено реалізації управління типовими практичними маневрами водія автопоїзда: перестроювання (обгін), що задається у вигляді двох арктангенсоїд, поворот на 90 градусів, рух по дузі клоотоїди. Для маневру поворот на 90 градусів досліджена залежність управління і кута складання від швидкості руху автопоїзда. Важливою особливістю дослідження є розробка програмного забезпечення, яке дало змогу виконати наочну візуалізацію маневрів руху в системі Unity 3D.

Ключові слова: програмна траєкторія, курсовий кут, кривизна кривої, динамічний коридор, еквідистанта, клоотоїда.

RESEARCHING OF A POSSIBILITY TO IMPLEMENT CONTROLLED ROAD TRAIN MOVEMENT ALONG A PROGRAM CURVE

A possibility of implementing controlled movement of a bolster-type road train (tractor truck with a trailer) along a program trajectory specified in an explicit, implicit, parametric form or with the law of changing its curvature is considered. The angle of rotation of the controlled wheel module is a function program trajectory curvature and current phase variables of the articulated vehicle model. The possibility of movement of a road train in a given corridor is investigated and the minimum allowable width of such a corridor is calculated. The process of trajectory designing in the form of a piecewise continuous function has also been implemented. Particular importance in the study is given to the implementation of controlling according to typical practical maneuvers of a road train driver: changing lane (overtaking) specified in the form of two arctangensoids, a 90 degrees turn, the movement along a clothoid arc. For the 90 degrees turn the dependence of controlling and folding angle on the road train the movement speed has been investigated. An important feature of the study is the development of software allowing to perform visualization of movement maneuvers in the Unity 3D system.

Key words: program trajectory, course angle, curve curvature, dynamic corridor, equidistant, clothoid.

УДК 532.72:532.546:539.3:519.63

Власюк А.П.

Національний університет «Острозька академія»

Жуковська Н.А.

Національний університет водного господарства та природокористування

Жуковський В.В.

Національний університет водного господарства та природокористування

Шендера І.М.

Національний університет водного господарства та природокористування

МАТЕМАТИЧНЕ ТА КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОСТОРОВИХ ДЕФОРМАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ ҐРУНТОВИХ МАСИВІВ З УРАХУВАННЯМ ТЕПЛОМАСОПЕРЕНЕСЕННЯ ТА СИЛ ЗВ'ЯЗНОСТІ

У статті проведено математичне моделювання напружено-деформованого стану ґрунтового масиву з урахуванням тепломасоперенесення та сил зв'язності у тривимірному випадку. З метою чисельного розв'язання поставленої крайової задачі створено програмний комплекс можливостями фреймворку Microsoft Visual Studio 2017 для Windows Desktop мовою програмування С#. На основі комп'ютерного моделювання поставленої задачі показано, що врахування сил зв'язності змінює значення зміщень, компонент нормальних та дотичних напружень і деформацій ґрунтового масиву.

Ключові слова: напружено-деформований стан, зміщення, напруження, деформації, тепломасоперенесення, сили зв'язності, чисельні методи, програмний комплекс.

Постановка проблеми. В умовах інтенсивного впливу різноманітних факторів людської діяльності та дії техногенних факторів на навколишнє середовище, зокрема забруднення ґрунтових вод різними розчинами солей та родючих земель радіоактивними речовинами, коливаннями температури, захороненням відходів виробництва, будівництвом атомних електростанцій та водоохолоджувачів біля них тощо, змінюються гідрологічні властивості ґрунтових середовищ. При цьому внаслідок гідродинамічних сил фільтраційного потоку та зміни власної ваги ґрунту, фільтраційних властивостей, може змінитись напружено-деформований стан ґрунтових масивів і основ, що, своєю чергою, досить часто є причиною виникнення аварійних ситуацій. Разом із тим збереження родючості ґрунту є важливим завданням сільськогосподарського виробництва. Механічний обробіток має забезпечити оптимальний напружено-деформований стан родючого шару з метою ефективного зростання культур. Тому постає актуальне питання дослідження факторів, що можуть впливати на деформаційні процеси ґрунтових середовищ, зокрема, врахування внутрішніх сил зв'язності, що залежать не тільки від

складу ґрунту, його вологості та щільності, але і від концентрації сольових розчинів у ньому.

Одним із сучасних методів прогнозування деформаційних процесів ґрунтових масивів та основ цивільних, промислових і гідротехнічних об'єктів та споруд, які потрапляють у зону впливу різних фізико-хімічних факторів, є математичне та комп'ютерне моделювання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження деформаційних процесів ґрунтових масивів та основ відображено в роботах науковців [1–3]. Математичне моделювання та дослідження напружено-деформованого стану ґрунтових масивів з урахуванням тепломасоперенесення та залежностей коефіцієнтів фільтрації і Ламе від концентрації сольових розчинів та температури, а також фільтраційних властивостей ґрунтових масивів з урахуванням масоперенесення наведено в працях А.П. Власюк, Н.А. Жуковської, В.В. Жуковського, В.Ю. Федорчук та ін. [4–8]. Вплив концентрації сольових розчинів на сили щеплення в глинистих ґрунтах проведено в роботі Н.Т. Кузлю [9]. Однак у цих роботах не розглянуто напружено-деформований стан ґрунтових масивів при врахуванні тепломасоперенесення в ньому та наявності сил зв'язності.

Тому метою статті є дослідження деформаційних процесів ґрунтових масивів з урахуванням впливу тепломасоперенесення та сил зв'язності у тривимірному випадку, побудова відповідної просторової математичної моделі, чисельне розв'язання поставленої крайової задачі та комп'ютерне моделювання отриманих результатів із подальшим аналізом отриманих результатів.

Постановка задачі. Розглянемо водонасичений ґрунтовий масив у тривимірному випадку, що займає область Ω з урахуванням тепломасоперенесення та сил зв'язності в ньому (рис. 1).

Ґрунтовий масив розглядається в межах лінійної теорії пружності з різними пружними параметрами (коефіцієнтами Ламе) $\lambda(c, T)$, $\mu(c, T)$ які залежать від концентрації солявого розчину та температури. На ґрунт діють сила тяжіння, архімедова та фільтраційна сили.

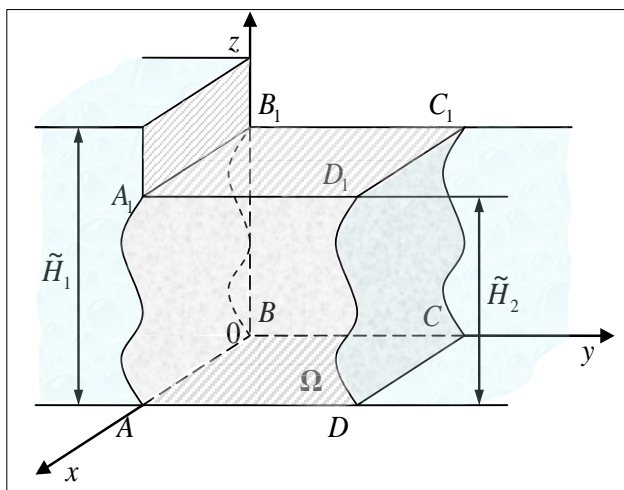


Рис. 1. Схема ґрунтового масиву у тривимірному випадку

На рис. 1. площину $ABCD$ позначимо як Γ_1 , $A_1B_1C_1D_1$ – Γ_2 , ABA_1B_1 і CDC_1D_1 – Γ_3 і Γ_4 відповідно, площини VCB_1C_1 та ADA_1D_1 – Γ_5 та Γ_6 відповідно. Межі Γ_1 та Γ_2 є теплоізолюваними та непроникними, а Γ_3 , Γ_4 , Γ_5 , Γ_6 – дренажними.

Задані значення п'єзометричних напорів \tilde{H}_1 , \tilde{H}_2 , температур \tilde{T}_1 та \tilde{T}_2 у водних басейнах Γ_3 , Γ_5 та Γ_4 , Γ_6 відповідно, причому $\tilde{H}_1 > \tilde{H}_2$, $\tilde{T}_1 > \tilde{T}_2$. У лівому басейні задано значення концентрації солей \tilde{C}_1 , а у правому – умову швидкого виносу солей. У результаті різниці напорів відбувається перенесення розчинених у воді речовин та тепла фільтраційним потоком. При цьому процеси фільтрації розчинених у воді речовин та тепла підлягають, відповідно, законам Дарсі, Фіка та Фур'є.

У досліджуваній області ґрунтового масиву Ω необхідно розрахувати розподіли зміщень

$u(X) = (U(X), V(X), W(X))$, нормальних складових деформацій $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ та дотичних складових деформацій $\varepsilon_{xy}, \varepsilon_{xz}, \varepsilon_{yz}$, нормальних складових напружень $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ та дотичних складових напружень $\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$, п'єзометричних напорів $h(X, t)$ концентрації солявих розчинів $c(X, t)$ та температури $T(X, t)$, $X \in \Omega$, $t > 0$ при наявності сил зв'язності.

Математична модель задачі. Математична модель поставленої крайової задачі у тривимірному випадку за наявності сил зв'язності та тепломасоперенесення в загальноприйнятих позначеннях має такий вигляд [1–10]:

$$\begin{aligned} & \mu(c, T)\Delta U + (\lambda(c, T) + \mu(c, T)) \frac{\partial \varepsilon_\theta}{\partial x} + \frac{\partial \lambda(c, T)}{\partial x} \varepsilon_\theta + \\ & + 2 \frac{\partial \mu(c, T)}{\partial x} \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial \mu(c, T)}{\partial y} \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \frac{\partial \mu(c, T)}{\partial z} \left(\frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial x} \right) - \\ & - \left(\left(3 \frac{\partial \lambda(c, T)}{\partial x} + 2 \frac{\partial \mu(c, T)}{\partial x} \right) T + (3\lambda(c, T) + 2\mu(c, T)) \frac{\partial T}{\partial x} \right) \alpha_T + X = 0, \\ & \mu(c, T)\Delta V + (\lambda(c, T) + \mu(c, T)) \frac{\partial \varepsilon_\theta}{\partial y} + \frac{\partial \lambda(c, T)}{\partial y} \varepsilon_\theta + \\ & + 2 \frac{\partial \mu(c, T)}{\partial y} \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial \mu(c, T)}{\partial x} \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \frac{\partial \mu(c, T)}{\partial z} \left(\frac{\partial V}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial y} \right) - \\ & - \left(\left(3 \frac{\partial \lambda(c, T)}{\partial y} + 2 \frac{\partial \mu(c, T)}{\partial y} \right) T + (3\lambda(c, T) + 2\mu(c, T)) \frac{\partial T}{\partial y} \right) \alpha_T + Y = 0, \\ & \mu(c, T)\Delta W + (\lambda(c, T) + \mu(c, T)) \frac{\partial \varepsilon_\theta}{\partial z} + \frac{\partial \lambda(c, T)}{\partial z} \varepsilon_\theta + \\ & + 2 \frac{\partial \mu(c, T)}{\partial z} \frac{\partial W}{\partial z} + \frac{\partial \mu(c, T)}{\partial x} \left(\frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial x} \right) + \frac{\partial \mu(c, T)}{\partial y} \left(\frac{\partial V}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial y} \right) - \\ & - \left(\left(3 \frac{\partial \lambda(c, T)}{\partial z} + 2 \frac{\partial \mu(c, T)}{\partial z} \right) T + (3\lambda(c, T) + 2\mu(c, T)) \frac{\partial T}{\partial z} \right) \alpha_T + Z = 0, \quad X \in \Omega, \end{aligned} \quad (1)$$

де компоненти масової сили обчислюються за формулами

$$X = \frac{dp_1}{dx} + f_1(c), \quad Y = \frac{dp_2}{dy} + f_2(c), \quad Z = \gamma_m + \frac{dp_3}{dz} + f_3(c), \quad X \in \Omega, \quad (2)$$

$$\varepsilon_x = \frac{\partial U}{\partial x}, \quad \varepsilon_y = \frac{\partial V}{\partial y}, \quad \varepsilon_z = \frac{\partial W}{\partial z}, \quad (3)$$

$$\varepsilon_{xy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right), \quad \varepsilon_{xz} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial x} \right), \quad \varepsilon_{yz} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial V}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial y} \right), \quad X \in \Omega,$$

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \lambda(c, T)\varepsilon_\theta + 2\mu(c, T)\varepsilon_x - (3\lambda(c, T) + 2\mu(c, T))\alpha_T \bar{T}, \\ \sigma_y &= \lambda(c, T)\varepsilon_\theta + 2\mu(c, T)\varepsilon_y - (3\lambda(c, T) + 2\mu(c, T))\alpha_T \bar{T}, \\ \sigma_z &= \lambda(c, T)\varepsilon_\theta + 2\mu(c, T)\varepsilon_z - (3\lambda(c, T) + 2\mu(c, T))\alpha_T \bar{T}, \end{aligned}$$

$$\tau_{xy} = 2\mu(c, T)\varepsilon_{xy}, \quad \tau_{xz} = 2\mu(c, T)\varepsilon_{xz}, \quad \tau_{yz} = 2\mu(c, T)\varepsilon_{yz}, \quad (4)$$

та рівняння конвективної дифузії за наявності тепломасоперенесення, рівняння конвективного теплоперенесення, узагальнені рівняння фільтрації солявих розчинів у неізотермічних умовах та рівняння нерозривності процесу за відповідних крайових умов на границях ґрунтового масиву для п'єзометричного напору, концентрації солей, температури, зміщень і напружень [6].

Тут: (1) – система рівнянь рівноваги в формі Ламе для зміщень ґрунту з врахуванням тепломасоперенесення; (3) – нормальні та дотичні деформації на підставі співвідношень Коші; (4) –

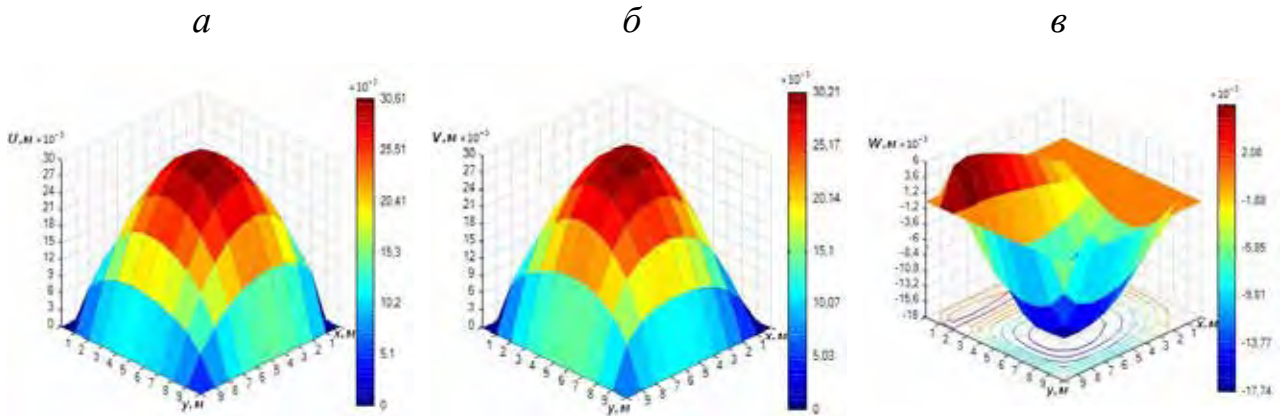


Рис. 2. Розподіли зміщень $U(\mathbf{X})$ (а), $V(\mathbf{X})$ (б), $W(\mathbf{X})$ (в) при $f(c) = ac + b$

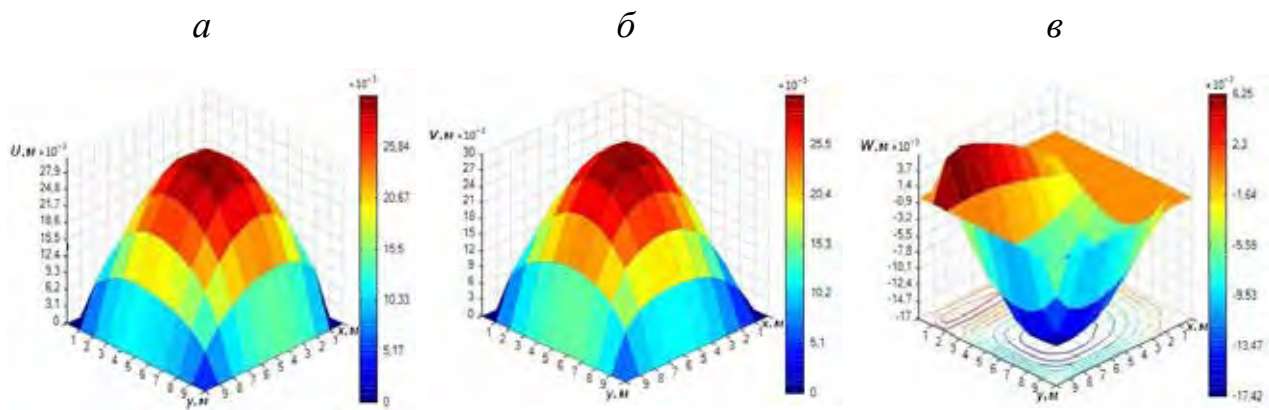


Рис. 3. Розподіли зміщень $U(\mathbf{X})$ (а), $V(\mathbf{X})$ (б), $W(\mathbf{X})$ (в) при $f(c) = \sqrt{ac + b}$

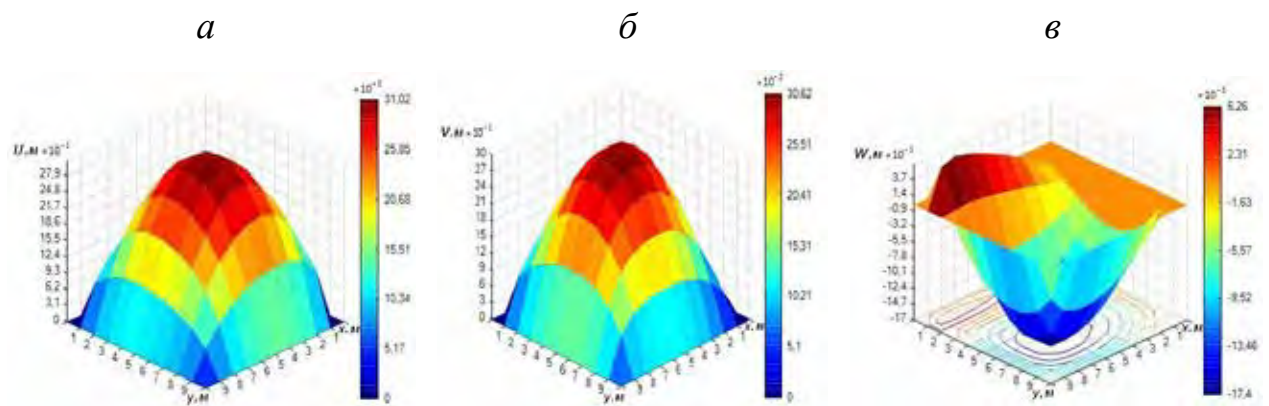


Рис. 4. Розподіли зміщень $U(\mathbf{X})$ (а), $V(\mathbf{X})$ (б), $W(\mathbf{X})$ (в) при $f(c) = a \cdot \ln(cb)$

нормальні та дотичні напруження на основі узагальненого закону Гука в оберненій формі.

У математичній моделі (1)–(4) використано такі позначення: $X = (x, y, z)$ – точка області Ω , $X \in \Omega$; Γ – границя області Ω ; t – час, $t > 0$; $u = (U, V, W)$ – зміщення, м; X, Y, Z – компо-

ненти масової сили, H ; $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ та $\varepsilon_{xy}, \varepsilon_{xz}, \varepsilon_{yz}$ – нормальні та дотичні деформації; $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ та $\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$ – нормальні та дотичні напруження, Па; $\varepsilon_\theta = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z$; p_1, p_2, p_3 – фільтраційні тиски сольового розчину, Па, $p_1 = \gamma_p(h(X, t) - x)$, $p_2 = \gamma_p(h(X, t) - y)$, $p_3 = \gamma_p(h(X, t) - z)$; $c(X, t) -$

концентрація сольового розчину, г/л; $T(X, t)$ – температура, °C; $h(X, t)$ – п'єзометричний напір, м; $f_1(c)$, $f_2(c)$, $f_3(c)$ – функції, що виражають вплив щільності ґрунту на його деформаційні процеси за рахунок сил зв'язності; $\lambda(c, T)$ і $\alpha(c, T)$ – коефіцієнти Ламе, що залежать від концентрації сольового розчину і температури, Па; $\gamma_{\text{вв}}$ – питома вага ґрунту, що знаходиться у зваженому стані, Па/м; α_T – середній коефіцієнт лінійного теплового розширення в інтервалі температур (T_0, T) [10].

Чисельний розв'язок задачі. Для знаходження значень зміщень $U(X)$, $V(X)$ та $W(X)$ та п'єзометричного напору $h(X, t)$ використано ітераційний метод Гауса-Зейделя. Для знаходження концентрації сольового розчину $c(X, t)$ та температури $T(X, t)$ використано метод прогонки [11].

Результати комп'ютерного моделювання та їх аналіз. Для чисельного розв'язування та комп'ютерного моделювання поставленої крайової задачі створено програмний комплекс можливостями фреймворку Microsoft Visual Studio 2017 для Windows Desktop мовою програмування C#, в якому у вигляді графіків та табличних даних відображено розподіли полів зміщень, компонент нормальних і дотичних напружень та деформацій, а також напору, концентрації солей та температури в досліджуваній області з урахуванням та без урахування впливу тепломасоперенесення та наявності сил зв'язності.

Як приклад, розглянуто просторовий напружено-деформований стан у водонасиченому ґрунтовому масиві в області

$$\Omega = \{X = (x, y, z) : 0 \leq x \leq l_1, 0 \leq y \leq l_2, 0 \leq z \leq l_3\},$$

що має форму прямокутного паралелепіпеда довжиною $l_1 = 10$ м, товщиною $l_2 = 10$ м та висотою $l_3 = 10$ м при $\alpha_T = 1 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{град}}$, $\gamma_{\text{вв}} = 1,3 \cdot 10^4 \frac{\text{Па}}{\text{м}}$, $\gamma_p = 1 \cdot 10^4 \frac{\text{Па}}{\text{м}}$ з такими функціями $f_1(c) = f_2(c) = f_3(c) = f(c)$:

а) $f(c) = ac + b$, $a = \text{const}$, $b = \text{const}$ (лінійна функція);

б) $f(c) = \sqrt{ac + b}$, $a = \text{const}$, $b = \text{const}$ (квадратична функція);

в) $f(c) = a \cdot \ln(cb)$, $a = \text{const}$, $b = \text{const}$ (логіарифмічна функція).

Залежності коефіцієнтів Ламе, коефіцієнта фільтрації від концентрації солевих розчинів взято з робіт А.П. Власюк, М.Т. Кузло, І.А. Філатової [12; 13].

Проведено серію чисельних експериментів, результати яких наведено у вигляді графіків при $t = 1080$ діб.

На рис. 2–4 наведено графіки зміщень $U(X)$, $V(X)$ та $W(X)$ у перерізі площиною xOy при $z = 5$ м з урахуванням тепломасоперенесення та наявності сил зв'язності при $a = 1$, $b = 1$.

Аналогічні графіки отримано для компонент нормальних та дотичних зміщень і напружень.

За результатами чисельних експериментів отримано наведені нижче висновки.

1. Зміщення вздовж осі Ox ($U(X)$) з урахуванням лінійної функції сил зв'язності в середньому зменшуються на 1,37%, квадратичної – 0,09%, логарифмічної – 0,03% порівняно зі зміщеннями без урахування сил зв'язності.

2. Зміщення вздовж осі Oy ($V(X)$) з урахуванням лінійної функції сил зв'язності в середньому зменшуються на 1,37%, квадратичної – 0,09%, логарифмічної – 0,03% порівняно зі зміщеннями без урахування сил зв'язності.

3. Зміщення вздовж осі Oz ($W(X)$) з урахуванням лінійної функції сил зв'язності в середньому зменшуються на 3,61%, квадратичної – 0,24%, логарифмічної – 0,09% порівняно зі зміщеннями без урахування сил зв'язності.

Аналогічні результати отримано для компонент нормальних та дотичних зміщень і напружень.

Таким чином, врахування сил зв'язності у розглянутому водонасиченому ґрунтовому масиві змінює розподіл зміщень, компонент нормальних та дотичних деформацій та напружень. Зокрема, найбільший вплив здійснює лінійна функція сил зв'язності, а найменший – логарифмічна.

Висновки. У статті сформульовано постановку задачі та проведено математичне і комп'ютерне моделювання просторового напружено-деформованого стану ґрунтового масиву з урахуванням впливу тепломасоперенесення та наявності сил зв'язності. Знайдено чисельний розв'язок поставленої крайової задачі. З метою проведення комп'ютерного моделювання створено програмний комплекс можливостями фреймворку Microsoft Visual Studio 2017 для Windows Desktop мовою програмування C# та розглянуто водонасичений ґрунтовий масив, що має форму прямокутного паралелепіпеда. Як показали результати комп'ютерного моделювання та проведених чисельних експериментів, врахування сил зв'язності змінює напружено-деформований стан ґрунтового масиву за наявності тепломасоперенесення в ньому.

Список літератури:

1. Сергиенко И.В., Скопецкий В.В., Дейнека В.С. Математическое моделирование и исследование процессов в неоднородных средах. К.: Наукова думка, 1991. 432 с.

2. Encyclopedia of Thermal Stresses / Editor R.B. Hetnarski. Springer Dordrecht Heidelberg New York London, 2014.
3. Власюк А.П., Кузло М.Т. Математичне моделювання деформацій ґрунтових масивів при дії техногенних факторів: Монографія. Рівне: НУВГП, 2017. 211 с.
4. Vlasyuk A.P., Zhukovskaya N.A. Mathematical simulation of the stressed-strained state of the foundation of earth dams with an open surface under the influence of heat and mass transfer in two-dimensional case. Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2015. Vol. 88(2). Pp. 329–341.
5. Vlasyuk A.P., Zhukovska N.A., Zhukovsky V.V., Klos-Witkowska A., Pazdriy I., Iatsykovska U. Mathematical Modelling of three-dimensional problem of soil mass stressed-strained state considering mass and heat transfer. Proceedings of the 2017 IEEE 9th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications. September 2017. Vol. 1. Pp. 265–269.
6. Власюк А.П., Жуковська Н.А., Жуковський В.В., Федорчук В.Ю. Математичне та комп'ютерне моделювання впливу тепломасоперенесення на просторовий напружено-деформований стан ґрунтового масиву. Вчені записки Таврійського національного технічного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2018. Том 29 (68). № 2. С. 108–115.
7. Vlasyuk A., Borowik B., Zhukovska N., Zhukovsky V., Karpinsky V. Computer modeling of heat and mass transfer effect on the three-dimensional stressed-strained state of soil massif. 18th International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM 2018. 2018. Т. 18, №1.2. Pp. 153–160.
8. Vlasyuk A., Kochan R., Zhukovsky V., Zhukovska N. Mathematical and computer modeling of contaminant migration to filter trap in two-dimensional nonlinear case. 18th International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM 2018. 2018. Т. 18, № 2.2. Pp. 293–300.
9. Кузло Н.Т. Исследование влияния концентрации солевых растворов на силы сцепления в глинистых грунтах. Гидротехническое строительство. 2013. № 5. С. 51–53.
10. Коваленко А.Д. Термоупругость. К.: Вища школа, 1975. 216 с.
11. Самарский А.А., Гулин А.В. Численные методы математической физики. М.: Наука, 2003. 316 с.
12. Власюк А.П., Кузло М.Т. Експериментальні дослідження деяких параметрів фільтрації сольових розчинів в піщаних ґрунтах. Меліорація і водне господарство. Міжвідомчий темат. наук. зб. К., 2000. Вип. 87. С. 43–46.
13. Кузло М.Т., Філатова І.А. Дослідження впливу концентрації сольових розчинів на деформаційні характеристики ґрунтів. Гідромеліорація та гідротехнічне будівництво. Зб. наук. праць. Вип. 31. Рівне: НУВГП, 2007. С. 175–182.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ГРУНТОВОГО МАССИВА С УЧЕТОМ ТЕПЛОМАСОПЕРЕНОСА И СИЛ СВЯЗНОСТИ

В статье проведено математическое моделирование напряженно-деформированного состояния ґрунтового массива с учетом тепломассопереноса и сил связности в трехмерном случае. Для численного решения поставленной краевой задачи создан программный комплекс возможностями фреймворка Microsoft Visual Studio 2017 для Windows Desktop на языке программирования C#. На основании компьютерного моделирования поставленной задачи показано, что учет сил связности изменяет значение смещений, компонент нормальных и касательных напряжений и деформаций ґрунтового массива.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, смещения, напряжения, деформации, тепломассоперенос, силы связности, численные методы, программный комплекс.

MATHEMATICAL AND COMPUTER MODELLING OF THREE-DIMENSIONAL DEFORMATION PROCESSES OF SOIL MASSIF UNDER HEAT AND MASS TRANSFER AND COMMUNICATION FORCES EFFECT

The article presents a mathematical modeling of the stressed-strained state of the soil massif under heat and mass transfer and the forces of connectivity effect in the three-dimensional case. For the numerical solution of the set boundary problem, a software package was created with the capabilities of the Microsoft Visual Studio 2017 framework for Windows Desktop in the C# programming language. Based on the computer simulation of the task, it is shown that the inclusion of the connected forces changes the value of the displacements, the components of the normal and tangential stresses and deformations of the soil massif.

Key words: stressed-strained state; displacements; stresses; strains; mass and heat transfer, forces of connectivity, numerical methods, software complex.

Вовк І.В.

Одеський національний політехнічний університет

Беглов К.В.

Одеський національний політехнічний університет

МОДЕЛЮВАННЯ ВОДОГРІЙНИХ КОТЛІВ ПРИ ГЛИБОКИХ ЗБУРЕННЯХ ЗА ЗМІСТОМ ПАЛИВА

Використання біогазу є одним із перспективних напрямів розвитку енергетики України, але заміна природного газу на біогаз викликає низку проблем при експлуатації теплогенеруючого обладнання. Основною проблемою є коливання складу газу, що йде на горіння. Через різний склад газу відбуваються значні коливання витрат повітря і, як наслідок, змінюються властивості газоповітряного тракту і теплообмінних процесів. Розглянуто вплив зміни складу палива, що подається до топкового пристрою на потужність водогрійної котельні. Заради досягнення поставленої мети вдосконалено математичну модель спалювання газоподібного палива шляхом врахування нелінійної залежності кількості тепла, що подається до топкового пристрою та врахування зміни умов теплопередачі при значних коливаннях витрати димових газів. На базі розробленої імітаційної моделі трьох котлів КВГМ-50 проаналізовані динамічні характеристики у вигляді кривих розгону, отриманих під час збурення теплотворною здатністю палива.

Ключові слова: біогаз, водогрійні котли, глибоке збурення, перехідний процес.

Постановка проблеми. Нині активно ведуться дослідження з використання поновлюваних джерел енергії. Зокрема, розглядаються питання використання як палива біогазу, отриманого шляхом переробки органічних відходів сільськогосподарської діяльності. Заміна природного газу на біогаз викликає низку проблем під час експлуатації теплогенеруючого обладнання.

Основною такою проблемою можна вважати значні коливання складу газу, що йде на горіння. Це викликає значні коливання витрати повітря і, як наслідок, зміну аеродинамічних властивостей газоповітряного тракту і теплообмінних процесів у ньому [1, с. 44–52].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження по спалюванню біопалива в котельних установках проводяться досить давно. Вже створено та експлуатується багато котельних установок, які використовують як основне паливо біогаз чи рідке біопаливо. Проте ті котли, що експлуатуються, вже розраховані на спалювання біогазу, причому вважається, що склад палива не змінюється.

Дослідження спалювання несертифікованого палива, до якого й належить біогаз, проводились в обмеженій кількості робіт.

Так, математична модель спалювання несертифікованого палива розглянута у роботі М.В. Максимова, В.Ф. Ложечникова та ін. [1, с. 44–52]. Проте як паливо розглянуто попутний нафтовий газ, який спалюється в паровому котлі.

В роботах таких науковців, як О.І. Брунеткін, С.О. Горбан та А.В. Гусак [2, с. 32–36; 3, с. 79–84], показаний вплив складу палива на умови тепловіддачі у хвостових поверхнях нагріву котлів. Також, як й у попередній роботі, приклад був наведений для газу, теплотворна спроможність якого більша, ніж природного газу.

Якщо ж спалювати газ із теплотворною спроможністю, меншою за природний газ, то, як це показано в роботах таких науковців, як А.В. Лисюк і К.В. Беглов [4; 5], необхідно збільшувати площу теплообмінної поверхні з метою забезпечення постійної потужності котла.

Цього можна досягти, використовуючи наявне теплогенеруюче обладнання, якщо вмикати або вимикати його за необхідністю.

Постановка завдання. Метою статті є дослідити вплив зміни складу палива, що подається до топкового пристрою на потужність водогрійної котельні, зрівняти моделі котлів при глибоких збуреннях за змістом палива.

Виклад основного матеріалу дослідження. Котельний агрегат представляється у виді теплообмінника. Основні рівняння, які описують процеси теплообміну в котлі, наведені в публікації «Водогрійна котельня як об'єкт керування потужності» [6, с. 109–115].

Кількість теплоти, що сприймається в конвективній частині залежно від витрати димових газів та кількості тепла, яке надійшло з радіаційної частини, описуються такими рівняннями:

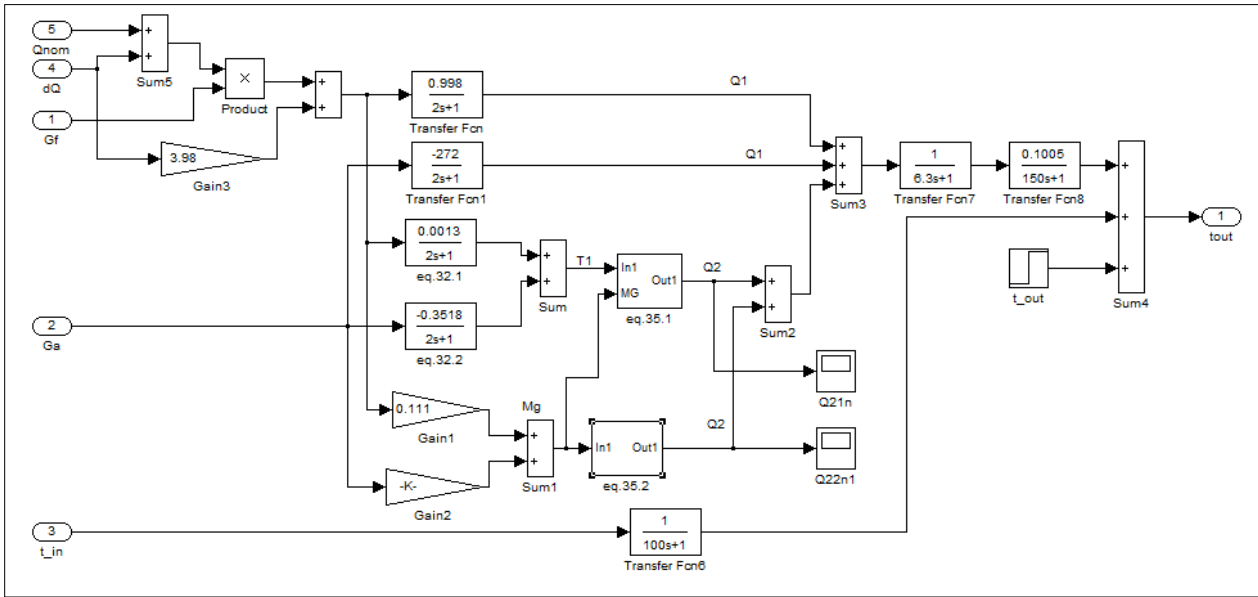


Рис. 1. Схема моделювання водогрійного котла

або

$$\Delta Q_F - c \bar{\vartheta}_{a1} \Delta M = \left(1 + \frac{\bar{M}c}{k_s}\right) \Delta Q_1 + \frac{m_1 c}{k_s} \frac{dQ_1}{dt}, \quad (1)$$

$$\frac{k_s}{k_s + \bar{M}c} \Delta Q_F - \frac{k_s c \bar{\vartheta}_{a1}}{k_s + \bar{M}c} \Delta M = \Delta Q_1 + \frac{m_1 c}{k_s + \bar{M}c} \frac{dQ_1}{dt}, \quad (2)$$

тут коефіцієнт $\frac{m_1 c}{k_s + \bar{M}c} = T$ має розмірність часу.

- де
- ΔQ_F – тепловиділення в топці;
- c – питома теплоємність;
- ΔM – витрата води через котел;
- ϑ_{a1} – температура газів;
- k_s – коефіцієнт.
- m_1 – маса води в котлі;
- $\bar{M}c$ – витрата води;
- ΔQ_1 – тепловий потік.

Для аналізу процесів, що відбуваються в конвективній частині котла, скористуємось рівняннями: необхідно, передусім, визначити температуру газів на виході з першої частини. Відповідні залежності можуть бути отримані з рівняння (2), якщо в ньому у відповідності з (1) виразити ΔQ_1 у вигляді функції $\Delta \vartheta_{a1}$. Після ділення на k_s одержуємо:

$$\frac{1}{k_s + \bar{M}c} \Delta Q_F - \frac{c \bar{\vartheta}_{a1}}{k_s + \bar{M}c} \Delta M = \Delta \vartheta_{a1} + T_1 \frac{d\vartheta_{a1}}{dt}, \quad (3)$$

або після скорочення

$$\frac{a_1}{k_s} \Delta Q_F - \frac{b_1}{k_s} \Delta M = \Delta \vartheta_{a1} + T_1 \frac{d\vartheta_{a1}}{dt}, \quad (4)$$

Якщо замість ΔM задана зміна коефіцієнту надлишку повітря, то за аналогією до (29) можна записати

$$\frac{a_1 - b_1 k_Q}{k_s} \Delta Q_F - \frac{b_1 k_a}{k_s} \Delta \pm = \Delta Q_1 + T_1 \frac{dQ_1}{dt}, \quad (5)$$

Для конвективних поверхонь нагріву справедливі рівняння:

теплого балансу на боці газу, що гріє:

$$M_{Ge} c_G \vartheta_{Ge} - M_{Ga} c_G \vartheta_{Ga} = Q + m_G c_G \frac{d\vartheta_{Gm}}{dt}, \quad (6)$$

балансу речовини на стороні газів:

$$M_{Ge} = M_{Ga}, \quad (7)$$

теплопередачі в системі «газ, що гріє, – труба» конвекцією

$$Q = k_4 M_G^{0.33} (\vartheta_m - \theta_m), \quad (8)$$

Вихідна величина першої частини котла $\Delta M_1 = \Delta M$ та $\Delta \vartheta_{a1}$ є вхідною величиною для другої частини, тобто

$$\Delta M_2 = \Delta M_1 \text{ і } \Delta \vartheta_{e2} = \Delta \vartheta_{a1}, \quad (9)$$

Написавши означені рівняння для малих відхилень і виключивши члени, які належать до статичного режиму, з (6) і (7) при $\vartheta_{m2} = 0.5(\vartheta_{e1} + \vartheta_{a2})$ одержуємо

$$c \vartheta_{e2} \Delta M_G + \bar{M}_G c \Delta \vartheta_{e2} - c \bar{\vartheta}_{a2} \Delta M - \bar{M}_G c \Delta \vartheta_{a2} = \Delta Q_2 + \frac{m c}{2} (\Delta \vartheta'_{e2} + \Delta \vartheta'_{a2}), \quad (10)$$

та з (8)

$$\Delta Q_2 = 0.33 k_4 \bar{M}_G^{0.33} \frac{\bar{\vartheta}_{e2} + \bar{\vartheta}_{a2} - 2\theta_m}{2\bar{M}_G} \Delta M + 0.5 k_4 \bar{M}_G^{0.33} (\Delta \vartheta_{e2} + \Delta \vartheta_{a2})$$

виключивши з цих рівнянь ϑ_{a2} , одержуємо

$$a_2 \Delta M_G + b_2 \frac{dM_G}{dt} + c_2 \Delta \vartheta_{e2} = \Delta Q_2 + T_2 \frac{dQ_2}{dt}, \quad (11)$$

де

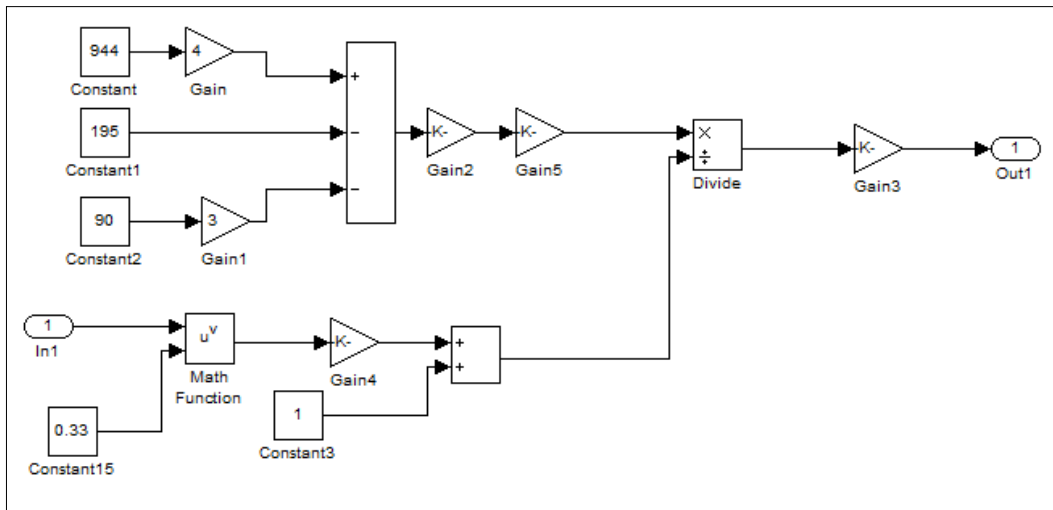


Рис. 2. Схема розрахунку коефіцієнта a_2 (12)

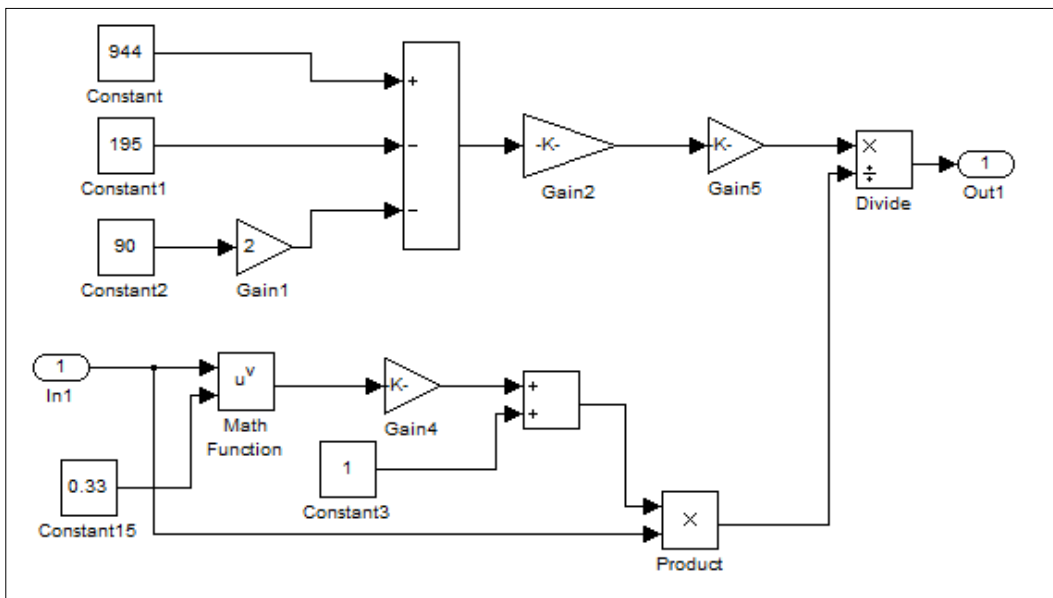


Рис. 3. Схема розрахунку коефіцієнта b_2 (13)

$$a_2 = c \frac{0.33(4\vartheta_{e2} - \vartheta_{a2} - 3\theta_{m2})}{1 + \frac{2c}{k_4} \bar{M}_G^{0.33}}, \quad (12)$$

$$b_2 = c \frac{0.33m_2(\vartheta_{e2} - \vartheta_{a2} - 2\theta_m)}{\bar{M}_G \left(1 + \frac{2c}{k_4} \bar{M}_G^{0.33}\right)}, \quad (13)$$

$$c_2 = \frac{1}{\frac{1}{k_4 \bar{M}_G^{0.33}} + \frac{1}{2c\bar{M}}}, \quad (14)$$

$$T_2 = \frac{cm_2}{k_4 \bar{M}_G^{0.33} + 2c\bar{M}}, \quad (15)$$

T_2 – стала часу, яка характеризує інерцію теплосприйняття конвективною частиною щодо топкової камери.

Реалізацію розглянутої моделі з урахуванням роботи «Водогрійна котельня як об’єкт керування потужності» [6, с. 109–115] зроблено за допомогою частини схеми, наведеної на рис. 1.

Входами моделі є dQ – відхилення теплотворної спроможності палива, Q_{nom} – номінальне значення теплотворної спроможності палива (номінальним прийняте значення для природного газу), Gf – відхилення витрати палива, G_a – відхилення

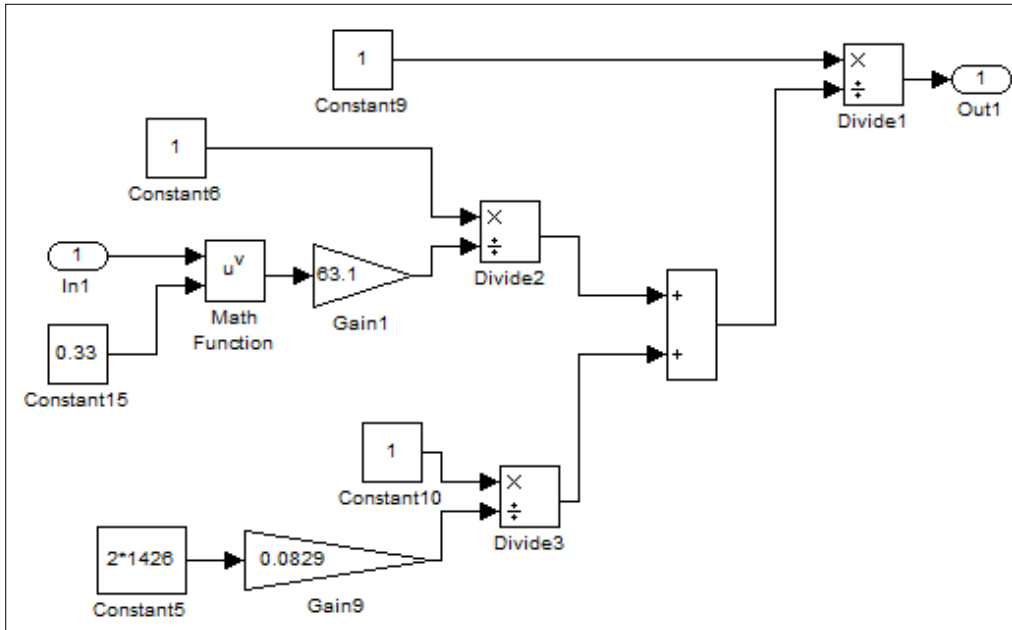


Рис. 4. Схема розрахунку коефіцієнта c_2 (14)

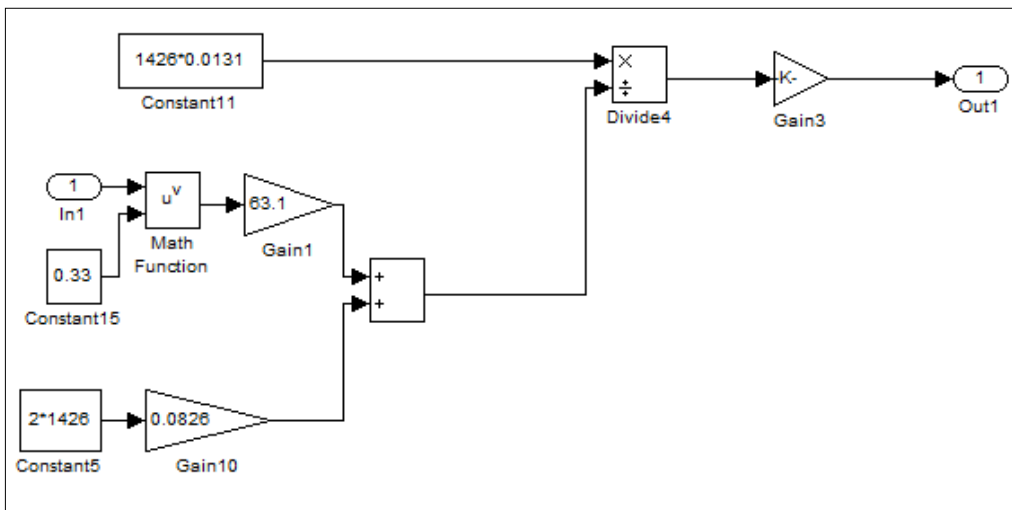


Рис. 5. Схема розрахунку коефіцієнта T_2 (15)

витрати повітря, t_{in} – відхилення температури води на вході в котел. Крім того, на цьому етапі дослідження прийняті постійними номінальні значення витрати палива – M_b та стехіометричної витрати повітря – V_0 . Вихідним параметром моделі є температура води на виході з котла.

Після теплового розрахунку котла були отримані коефіцієнти диференціальних рівнянь, що наведені вище.

Висновки. У роботі розглянуто вплив теплотворної спроможності палива на статичні та динамічні властивості водогрійного котла.

Отримала подальший розвиток математична модель водогрійного котла: відомі лінійні диференціальні рівняння були доповнені нелінійною

залежністю їхніх коефіцієнтів від величини збурення теплотворною спроможністю палива.

Виявлено, що у разі збільшення теплотворної спроможності палива в десять разів температура води після котла зростає не в 10 разів, як це прогнозує лінійна модель, а лише в 5 разів. Тобто коефіцієнт передачі по каналу «тепловторна спроможність – температура води після котла» зменшився удвічі порівняно зі значенням при роботі на базовому паливі.

Цей факт можна пояснити складними теплогидравлічними процесами, які відбуваються в конвективних поверхнях нагріву, а саме зміною коефіцієнта теплопередачі від газів до стінок конвективної поверхні.

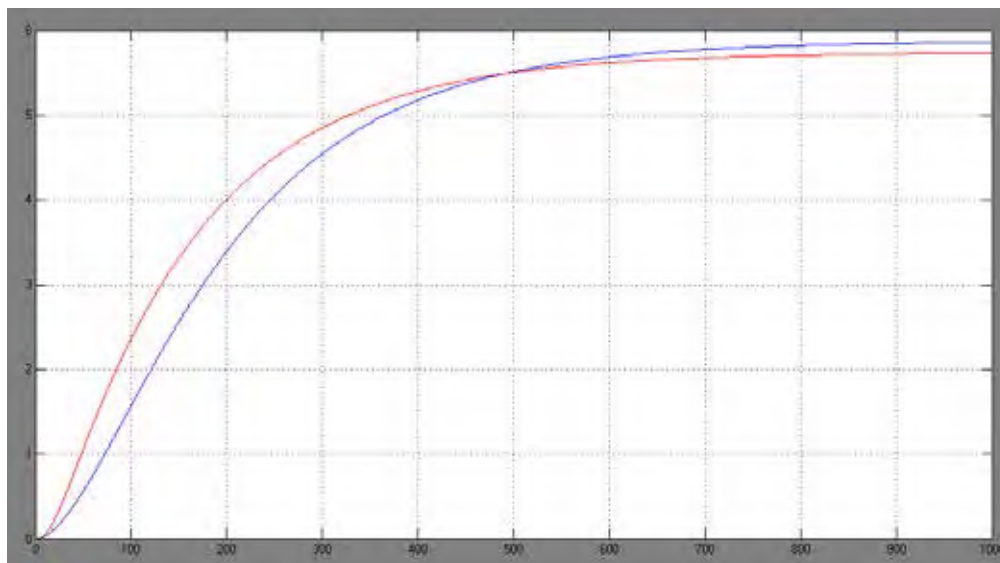


Рис. 6. Перехідний процес відхилення при $\Delta Q=1,54$ МДж/м³

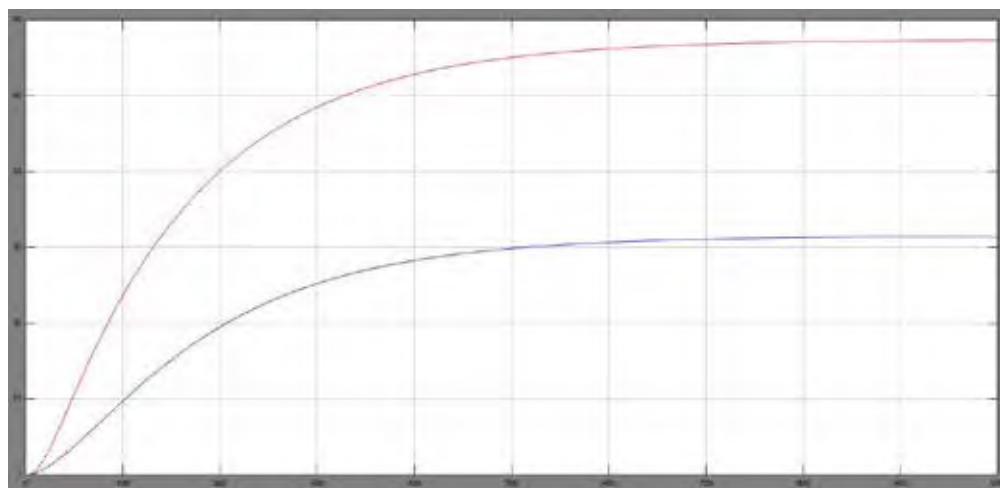


Рис. 7. Перехідний процес відхилення при $\Delta Q=15,4$ МДж/м³

Список літератури:

1. Maksimov M.V., Lozhechnikov V.F., Dobrovolskaya T.S., Bondarenko A.V. Mathematical model of non-certified burning fuels. East European journal of advanced technologies. 2014. Vol. 2. No 8 (68). P. 44–52. URL: <http://journals.urau.ua/eejet/article/view/22420/21760>.
2. Brunetkin O.I., Gorban S.O. Heat transfer optimization of heat exchange surfaces of boiler equipment with decrease in consumption of combustion products. Proceedings of the Odessa Polytechnic University. 2017. Vol. 3(53). С. 32–36.
3. Brunetkin O.I., Gusak A.V. Determination of the range of change of the convective heat transfer coefficient during the burning of alternative types of gaseous fuel. Proceedings of the Odessa Polytechnic University. Vol. 2(46). С. 79–84.
4. Лысюк А.В. Усовершенствование АСУ барабанного котла для сжигания горючих искусственных газов. Автоматика–2017: XXIV Міжнародна конференція з автоматичного управління (м. Київ, Україна, 13–15 вересня 2017 р.). Київ, 2017.
5. Лысюк А.В., Беглов К.В. Оптимизация работы группы котельных агрегатов при сжигании несертифицированного топлива. Автоматика–2017: XXIV Міжнародна конференція з автоматичного управління (м. Київ, Україна, 13–15 вересня 2017 р.). Київ, 2017.
6. Вовк І.В., Дуба І.Е., Конушбаєва Т.В., Беглов К.В. Водогрійна котельня як об'єкт керування потужності. Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. 2018. Том 29 (68). № 3. Ч. 1. С. 109–115.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОДОГРЕЙНЫХ КОТЛОВ ПРИ ГЛУБОКИХ ВОЗМУЩЕНИЯХ ПО СОСТАВУ ТОПЛИВА

Использование биогаза является одним из перспективных направлений развития энергетики Украины, но замена природного газа биогазом вызывает ряд проблем при эксплуатации теплогенерирующего оборудования. Основной проблемой является колебания состава газа, идущего на горение. Из-за различного состава газа происходят значительные колебания расхода воздуха и, как следствие, меняются свойства газовоздушного тракта и теплообменных процессов. Рассмотрено влияние изменения состава топлива, подаваемого к топочному устройству на мощность водогрейной котельной. Для достижения поставленной цели усовершенствована математическая модель сжигания газообразного топлива путем учета нелинейной зависимости количества тепла, подаваемого к топочному устройству и учета изменения условий теплопередачи при значительных колебаниях расхода дымовых газов. На базе разработанной имитационной модели 3-х котлов КВГМ-50 проанализированы динамические характеристики в виде кривых разгона, полученных при возбуждении теплотворной способностью топлива.

Ключевые слова: биогаз, водогрейные котлы, глубокое возмущение, переходный процесс.

MODELING OF WATER BOILERS IN FUEL CONTAMINATED FLUID FUELS

The use of biogas is one of the most promising directions for the development of Ukraine's energy sector; but the replacement of natural gas with biogas causes a number of problems with the operation of heat generating equipment. The main problem is the fluctuations in the composition of the combustion gas. Due to the different composition of gas, there are significant fluctuations in air flow and, as a consequence, varying properties of the gas path and heat transfer processes. The influence of changes in fuel composition, which is fed to the furnace unit on the power of a water heating boiler; is considered. To achieve this goal, a mathematical model for combustion of gaseous fuels has been improved by taking into account the nonlinear dependence of the amount of heat supplied to the furnace device and taking into account the change in the heat transfer conditions at significant fluctuation fluctuation fluctuations. Based on the developed simulation model of 3 boilers KVGM-50, dynamic characteristics are analyzed in the form of acceleration curves obtained when disturbed by the calorific value of fuel.

Key words: biogas, water heating boilers, deep perturbation, transition process.

Водка О.О.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Панаріна О.Д.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

РОЗРОБКА МЕТОДІВ КОМП'ЮТЕРНОГО СИНТЕЗУ ТА АНАЛІЗУ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРІАЛІВ НЕОДНОРІДНОЇ СТРУКТУРИ¹

Метою роботи є розроблення програмного забезпечення для моделювання мікроструктури металів. Розроблено програмне забезпечення з використанням методу кліткових автоматів, який на основі випадковим чином заданих центральних точок, ядер зерен дає змогу отримати повну картину процесу кристалізації металу. Отримані результати порівняні із уже відомими результатами, отриманими іншими методами.

Ключові слова: мікроструктура металів, штучне відтворення мікроструктури, метод кліткових автоматів, програмне забезпечення.

На мікрорівні металеві матеріали являють собою полікристалічну структуру, причому кожен кристал має свою орієнтацію в просторі. За мікрокристалічної структури кожен кристал полікристалічної структури володіє анізотропними (залежними від напрямку) механічними властивостями. Врахування анізотропії матеріалу на мікрорівні дає змогу оцінити скачки в напруженому стані, що виникають між кристалами. Саме вони є джерелами мікро- і макротріщин [1–8].

Беручи до уваги те, що мікроструктура є досить складною, необхідно моделювати форми кристалів, що може дати можливість передбачити поведінку металів у разі дії різного роду навантаження.

Для моделювання виділяється декілька методів штучного відтворення мікроструктури металів: тесцеляція Вороного, принцип клітинних автоматів, метод Монте-Карло.

Найбільш простим методом моделювання є метод кліткових автоматів. Саме цей метод було розглянуто в роботі.

Постановка задачі. У роботі пропонується розробити програмне забезпечення, що дає змогу моделювати мікроструктуру металів із використанням методу кліткових автоматів. Для цього необхідно виконати такі задачі:

- розглянути методи штучного відтворення мікроструктури металів;
- вивчити метод кліткових автоматів моделювання мікроструктур;

– розробити програмне забезпечення (ПЗ), що дає змогу моделювати мікроструктури металів по випадковим чином заданих центрах зерен;

– протестувати роботу ПЗ та порівняти результати з уже відомими результатами, отриманими іншими методами моделювання мікроструктур.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Термін «кліткові автомати» почав використовуватись у середині ХХ ст. для позначення сукупності залежних елементів із заданими станами і правилами, згідно з якими стани цих елементів і залежності між ними змінюються в часі. Час і стани при цьому дискретні. Використання описаних моделей для формального моделювання самовідтворюваних організмів вперше запропоновано в роботі Фон Неймана. Елементи кліткових автоматів запропоновано представити одновимірними або двовимірними нескінченними прямокутними таблицями. Стан елемента змінюється залежно від його стану і від стану двох (або чотирьох – для двовимірного випадку) найближчих сусідів.

Клітковий автомат – дискретна модель, що вивчається в математиці, теорії обчислення, фізиці, теоретичній біології і мікромеханіці. Включає регулярну сітку клітинок, кожна з яких може перебувати в одному зі станів скінченної множини, таких як 1 і 0. Решітка може бути будь-якої розмірності. Для кожної клітинки визначено безліч клітинок, які називаються околицею. Приміром, околиця може бути визначена як всі клітинки на відстані не більше 2 від поточної (околиця фон Неймана рангу 2). Для роботи клітинного автомата потрібно задання початкового стану всіх

¹ Дана робота виконана за підтримки МОН України в рамках реалізації Науково-Дослідної Роботи "Розробка методів математичного моделювання поведінки нових та композиційних матеріалів для оцінки ресурсу та прогнозування надійності елементів конструкцій" (№ ДР 0117U004969).

клітинок і правил переходу клітинок з одного стану в інший. На кожній ітерації, використовуючи правила переходу і стану сусідніх комірок, визначається новий стан кожної клітинки. Зазвичай правила переходу однакові для всіх клітинок і застосовуються одразу до всієї решітки.

Моделювання за допомогою кліткових автоматів. Клітковий автомат K – це впорядкована множина з чотирьох компонентів:

$$K = \langle z^d, N, A, \varphi \rangle, \quad (1)$$

де z^d – множина d -мірних векторів з цілочисельними координатами – клітковий простір;

N – скінченна множина потужності m векторів з z^d :

$$N = \{n_i \mid n_i = (x_{i1}, \dots, x_{id}), \exists n_i = 0\}, i = 1, \dots, m, \quad (2)$$

нульовим вектором – шаблон сусідства клітинки;

A – скінченна множина потужності k станів клітинки з виділеним станом спокою, \emptyset – алфавіт кліткового автомата;

φ – локальна функція переходів, визначена в дискретні моменти часу, яка змінює стани клітинки, що є нульовим елементом у шаблоні, залежно від стану клітинок, що складають шаблон сусідства $\varphi : A^m \rightarrow A$; при цьому $\varphi(\emptyset, \emptyset, \dots, \emptyset) = \emptyset$. Стан усіх клітинок у момент часу t створює поточну конфігурацію: $c^t : z^d \rightarrow A$.

Застосування локальної функції переходів до поточної конфігурації задає глобальну функцію переходів: $c_{j1} = g(c_j)$. Впорядкована сукупність конфігурацій, що отримується з початкової послідовним застосуванням глобальної функції переходів, утворює еволюцію e кліткового автомата: $e = \langle c_0, c_1, \dots, c_s \rangle$ [1]. Тобто кліткові автомати – дискретна динамічна система, що є сукупністю однакових клітинок, однаковим чином сполучених між собою. Всі клітинки утворюють так звану решітку кліткового автомата. Решітки можуть бути різних типів, відрізняючись як за розмірністю, так і за формою клітинок. Кожна клітинка є скінченим автоматом, стани якого визначаються станами сусідніх клітинок і, можливо, її власними станами.

Відзначимо, що в кліткових автоматах як в обчислювальних моделях не розглядаються вхідні і вихідні дії. В апаратній реалізації кліткові автомати зазвичай називають однорідними структурами.

Кліткові автомати в загальному випадку характеризуються такими властивостями:

1. Зміна значень усіх клітинок відбувається одночасно після обчислення нового стану кожної клітинки решітки.

2. Решітка однорідна. Неможливо відрізнити жодні два місця на решітці за ландшафтом.

3. Взаємодії локальні. Лише околишні клітинки (як правило, сусідні) здатні вплинути на цю клітинку.

4. Множина станів клітинки кінцева [2].

В одновимірному (лінійному) КА решітка являє собою ланцюжок клітинок (одновимірний масив), в якій для кожної з них, крім крайніх, є по два сусіди. Для усунення крайових ефектів решітка «загортається» у тор. Це дає змогу використовувати таке співвідношення для всіх клітин автомата:

$$y'[i] = f(y[i-1], y[i], y[i+1]), \quad (1)$$

де f – функція переходів клітинки;

$y'[i]$ – стан i -ої клітинки в наступний момент часу;

$y[i-1]$ – стан $(i-1)$ -ої клітинки в даний момент часу;

$y[i]$ – стан i -ої клітинки в даний момент часу;

$y[i+1]$ – стан $(i+1)$ -ої клітинки в даний момент часу.

У двовимірному (площинному) КА решітка реалізується двовимірним масивом. У ній кожна клітина має вісім сусідів. Для усунення крайових ефектів решітка так само, як і в попередньому випадку, «загортається» у тор. Це дає змогу використовувати таке співвідношення для всіх клітинок автомата:

$$y'[i][j] = f \left(\begin{array}{l} y[i][j], y[i-1][j], y[i-1][j+1], y[i][j+1], \\ y[i+1][j+1], y[i+1][j], y[i+1][j-1], \\ y[i][j-1], y[i-1][j-1] \end{array} \right). \quad (2)$$

На практиці широкого поширення здобули околи Мура та окіл фон Неймана (рис. 1). В околі Мура клітинки вважаються сусідами, коли вони мають спільну сторону або вершину. Тобто кожна клітинка має 8 рівнозначних сусідів. В околі фон Неймана сусідами клітинки є тільки ті клітинки, які мають із цією клітинкою спільну сторону, тобто в локальному околі цієї клітинки є чотири клітинки.

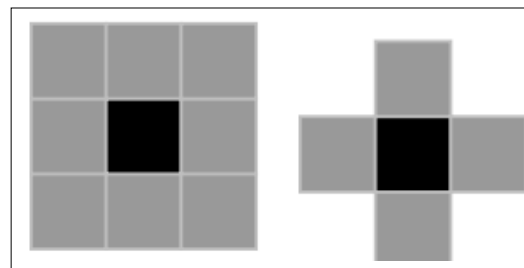


Рис.1. Окіл Мура та окіл фон Неймана

Для реалізації методу кліткових автоматів було розроблено програмне забезпечення, яке дає змогу моделювати мікроструктури металів по випадковим чином заданих центрах зерен.

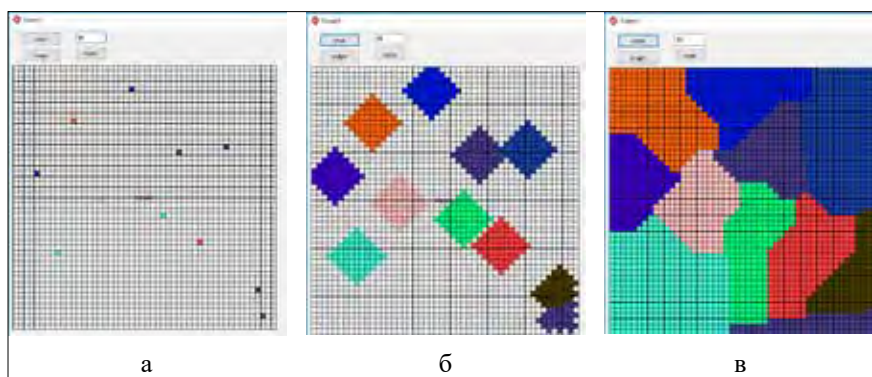


Рис. 2. Стадії роботи алгоритму: а – початкові точки; б – стадія розростання зерен; в – результат

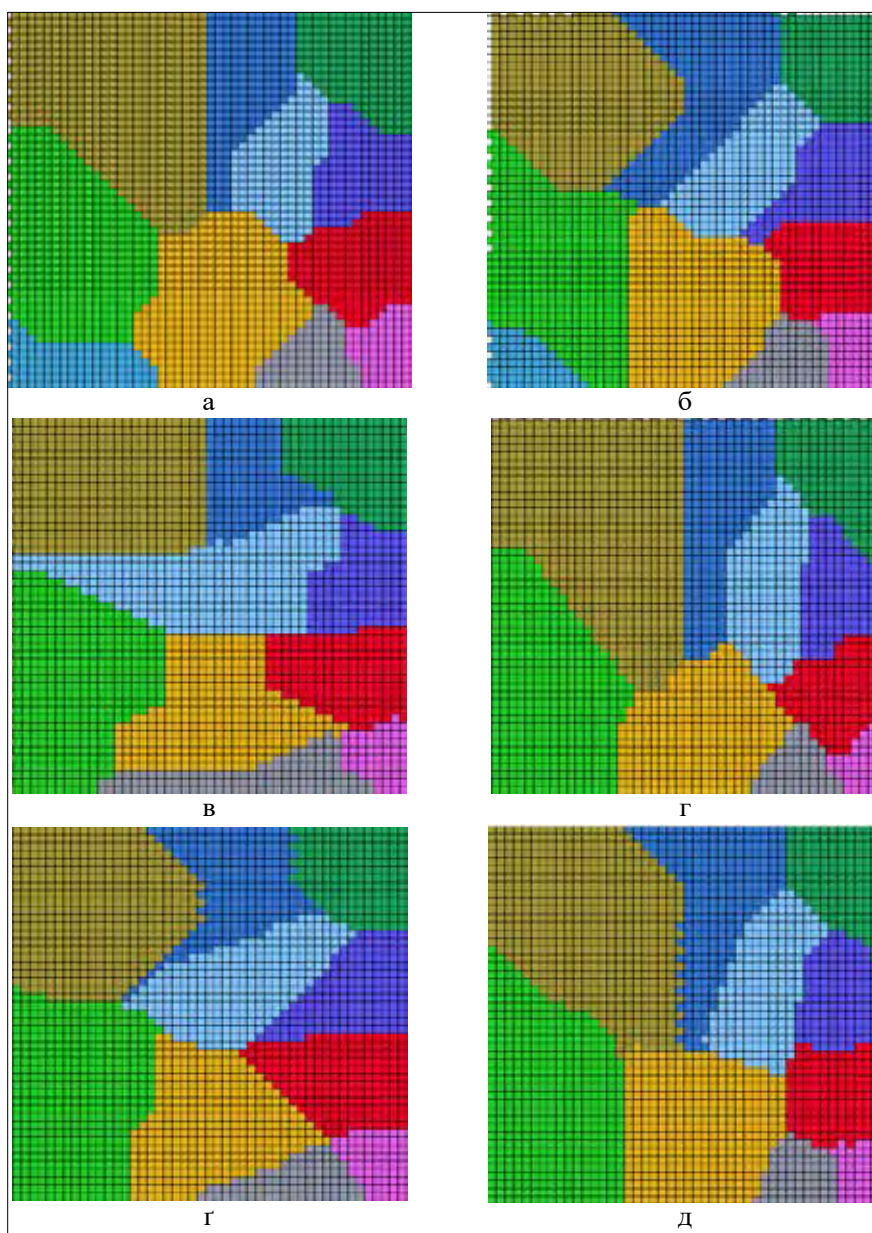


Рис. 3. Результати роботи алгоритму:
а – окіл фон Неймана; б – окіл Мура; в, г – кристалізація відбувається швидше у напрямку осі x , окіл фон Неймана та Мура; з, д – кристалізація відбувається швидше у напрямку осі y , окіл фон Неймана та Мура

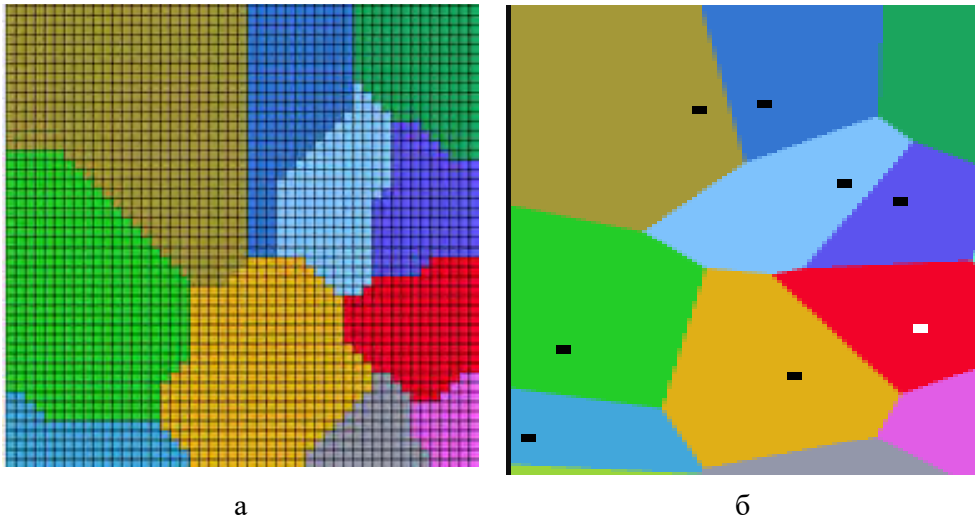


Рис. 4. Порівняння результатів роботи алгоритмів:
а – метод клітинних автоматів; б – тесеція Вороного

Метод кліткових автоматів широко використовується в моделюванні мікроструктури металів. На першому кроці алгоритму росту зерна формується деякий дискретний простір кліткового автомата, який складається з клітинок кліткових автоматів (рис. 2).

На наступному етапі випадковим чином обирається набір початкових клітинок, а далі змінна стану, що описує стан клітинок, встановлюється в «вже вирослі». Ці клітинки являють собою ядро зерна (рис. 2 а).

Другий крок алгоритму оснований на рості зерна. Правило переходу на цьому етапі визначається так: коли сусід конкретної клітинки на попередньому кроці перебував у стані «вже вирослі», то ця клітинка може також змінити свій стан у «все вирослі» (рис. 2 б).

Зерна можуть рости в усіх напрямках до тих пір, поки воно не зустрінеться з іншим зерном. Після цього ріст триває тільки у тих напрямках, де ще немає зерен. Цей процес виконується до тих пір, поки досліджуваний простір не заповнюється зернами (рис. 2 в) [3].

Результати роботи розробленого програмного забезпечення представлені на рис. 3. На рис. 3 а представлена мікроструктура з околom фон Неймана, на рис. 3 б – з околom Мура.

Також були розглянуті такі ситуації, коли зерна ростуть з різною швидкістю у різних напрямках: вдвічі швидше по x ніж по y (рис. 3 в) та вдвічі швидше по y ніж по x (рис. 3 г) при цьому точки мають окол фон Неймана, а також вдвічі швидше по x ніж по y (рис. 3 г) та вдвічі швидше по y ніж по x (рис. 3 д) при цьому точки мають окол Мура. Усі результати представлені за однакових центрів зерен кількістю 10 точок.

Порівняння результатів роботи програмного забезпечення проводилося методом порівняння результатів, отриманих методом кліткових автоматів (рис. 4 а), та уже відомих результатів, отриманих методом тесеції Вороного (рис. 4 б).

Як можна побачити на рисунках, результати, отримані за допомогою розробленого програмного забезпечення методом кліткових автоматів, та результати, отримані методом Вороного, є дуже подібними, що може свідчити про те, що розроблене програмне забезпечення працює коректно. Похибка в результатах може бути спричинена тим, що в методі кліткових автоматів границі клітинок є дискретними.

Висновки. У результаті було розроблено програмне забезпечення для штучного відтворення мікроструктури металу методом кліткових автоматів. Отримані результати були порівняні з уже відомими результатами, отриманими за методом Вороного.

Список літератури:

1. Захарчук И.И. и др. Обеспечение информационной защиты беспроводных сенсорных сетей на основе клеточных автоматов. Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. №. 11. С. 45–45.
2. Наумов Л., Шалыто А. Клеточные автоматы. Реализация и эксперименты. URL: <http://www.softcraft.ru/auto/switch/kla/> (дата звернення: 2.11.2018)
3. Madej L. Digital/virtual microstructures in application to metals engineering – a review. Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2017. Vol. 17, No. 4. P. 839–854.

4. Zinoviev A., Zinovieva O., Ploshikhin V. Evolution of grain structure during laser additive manufacturing simulation by a cellular automata method. *Materials & Design*. 2016. Vol. 106. P. 321–329.
5. Akbari M., Asadi P., Givi M. B., Zolghadr P. A cellular automaton model for microstructural simulation of friction stir welded az91 magnesium alloy. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*. 2016. Vol. 24, No. 3. P. 035012.
6. Kühbach M., Gottstein G., Barrales-Mora L.A. A statistical ensemble cellular automaton microstructure model for primary recrystallization. 2016. Vol. 107. P. 366–376.
7. Raabe D. Mesoscale simulation of spherulite growth during polymer crystallization by use of a cellular automaton. *Acta Materialia*. 2004. Vol. 52, No. 9. P. 2653–2664.
8. Raabe D. Cellular automata in materials science with particular reference to recrystallization simulation. *Annual Review of Materials Research*. 2002. Vol. 32, No. 1. P. 53–76.

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ КОМПЬЮТЕРНОГО СИНТЕЗА И АНАЛИЗА ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛОВ НЕОДНОРОДНОЙ СТРУКТУРЫ

Целью работы является разработка программного обеспечения для моделирования микроструктуры металлов. Разработано программное обеспечение с использованием метода клеточных автоматов, который на основе случайным образом заданных центральных точек, ядер зерен позволяет получить полную картину процесса кристаллизации металла. Полученные результаты сравнены с уже известными результатами, полученными другими методами.

Ключевые слова: микроструктура металлов, искусственное воспроизводство микроструктуры, метод клеточных автоматов, программное обеспечение.

DEVELOPMENT OF METHODS OF COMPUTER SYNTHESIS AND ANALYSIS OF THE CHARACTERISTICS OF MATERIALS OF INHOMOGENEOUS STRUCTURE

The aim of this work is to develop software for the simulation of the microstructure of metals. The software is developed using the method of cellular automata, which is based on randomly specified center points of the nuclei of the grains, allows obtain a complete picture of the crystallization process of the metal. The results are compared with already known results obtained by other methods.

Key words: microstructure of metals, artificial reconstruction of a microstructure, method of cellular automata, software.

УДК 681.51

Дмитришин С.С.

Одеський національний політехнічний університет

Давидов В.О.

Одеський національний політехнічний університет

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ГОРІННЯ ВУГЛЕВОДНИХ ГАЗІВ У ПАРОГЕНЕРУЮЧИХ УСТАНОВКАХ ШЛЯХОМ ЗМІНИ ВІДНОШЕННЯ ПАЛЬНЕ/ПОВІТРЯ

Важливим та одним з основних завдань персоналу є підтримка оптимального режиму котла за цих умов його роботи, що відповідає максимально можливому значенню ККД котла нетто. Тому виникає необхідність визначення впливу статичних характеристик котла, а саме: навантаження, температури живильної води, повітряного режиму топки й характеристики палива – на показники його роботи при зміні значень перерахованих параметрів. Для вирішення наукового завдання, що полягає в підтримці оптимального співвідношення при спалюванні в повітрі вуглеводневого газу невідомого складу шляхом визначення максимальної температури горіння та забезпечення заданих характеристик факела полум'я при зміні поточної витрати повітря, необхідно визначити статичні та динамічні характеристики об'єкта керування. Необхідно розробити математичну модель об'єкта керування та моделі визначення умовної формули вуглеводневого палива за вимірними витратами повітря і вуглеводневого газу і температури полум'я, методи реалізації ефективного спалювання в парогенеруючому обладнанні шляхом зміни співвідношення паливо-повітря з метою забезпечення максимальної ефективності.

Ключові слова: теплова електростанція, паровий котел, автоматизація, співвідношення паливо-повітря, ефективність.

Постановка проблеми. У сучасних ринкових економічних відносинах і за умови відсутності інвестиційних ресурсів, а також істотного підвищення вимог до викиду речовин, що забруднюють навколишнє природне середовище, економічності процесу горіння необхідно приділяти особливу увагу. Тому є актуальною задача доповнення регуляторами наявної системи автоматичного регулювання парових та водогрійних котлів, що використовують як паливо несертифіковані гази, які забезпечать максимальну температуру спалювання поточної суміші газів у факелі. Забезпечення ефективності та екологічної безпеки використання палива як газопальникових пристроїв, так і усього, що використовує паливо агрегату, можливе шляхом зміни конструкції пальників, режимними методами або управлінням властивостями палива.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У публікаціях М. Davodia на тему «Основні джерела спалювання газу та забрудненого повітря на заводах по переробці природного газу» [1, с. 17], Niels Berghout Machteld van den Broek, André Faaij на тему «Технічно-економічні показники та проблеми застосування захоплення CO₂ у промисловості: приклад п'яти промислових під-

приємств» [2, с. 259] проводиться аналіз впливу та складу викидів заводів, що займаються спалюванням природного газу, та проблем, з якими підприємства мають справу.

У публікації авторів Liu Hong, Peiwen Li, Kai Wang на тему «Оптимізація розмірів проточного каналу паливних елементів PEM-аналіз математичного моделювання та експериментальна перевірка» [3, с. 83] розглянута модель спалювання природного газу, мазуту, а також несертифікованого газу, при цьому було прийнято реконструювати теплообмінник у вертикальне положення, а також розділити вихідні димові гази на два потоки, один з яких веде назад у паровий котел.

В іншій відкритій літературі не виявлено ніяких аналітичних методів і моделей, що дають змогу підтримувати задані енергетичні характеристики енергетичного обладнання у разі якісної зміни властивостей вуглеводневого палива.

Постановка завдання. Для вирішення завдання підтримки оптимального співвідношення при спалюванні в повітрі вуглеводневого газу невідомого складу шляхом пошуку максимальної температури горіння при забезпеченні заданих характеристик факела полум'я при зміні поточної витрати повітря необхідно розробити

моделі визначення умовної формули вуглеводневого палива за вимірними витратами повітря і вуглеводневого газу і температурі полум'я і методи реалізації його ефективного спалювання в парогенеруючому обладнанні шляхом зміни відношення паливо/повітря з метою забезпечення максимальної ефективності.

При цьому необхідно розглянути такі допоміжні завдання:

1. Із метою проведення дослідження, перш за все, необхідно провести аналіз способів отримання вуглеводневих газів змінного складу й особливостей їх спалювання в парогенеруючих установках. На цій основі розробити імітаційну модель спалювання вуглеводневих газів змінного складу в камерах згоряння за допомогою вимірювань температури факела і витрат пального й окислювача. Математична модель має базуватися на обчисленні умовної формули газоподібного вуглеводневого палива, заснованої на законах збереження речовини, Дальтона, хімічної рівноваги по парціальних тисках, яка дасть змогу визначити кількісний склад умовної формули, ентальпію і склад продуктів згоряння.

2. Із метою розробки методу і моделі забезпечення сталості заданих характеристик генерації пару при зміні в часі якісного складу вуглеводневого газу необхідно визначити динамічні характеристики парового котла, засновані на рівняннях матеріального і теплового балансів, законах конвективного і променистого теплообміну і властивостях стиснутого газоподібного середовища.

3. Варто провести дослідження розробленого методу забезпечення заданого парового навантаження, який базується на математичних моделях обчислення умовної формули газоподібного вуглеводневого палива і визначення динамічних характеристик парового котла. Пошук максимального рівня ефективності генерації пари при використанні вуглеводневого газу змінного складу здійснювати шляхом постійної зміни відношення паливо/повітря за допомогою вимірювань температури факела в парогенеруючій установці.

Виклад основного матеріалу дослідження. Автоматична система регулювання живлення призначена для підтримки матеріальної відповідності між подачею живильної води в котел і витратою пара. Показником цієї відповідності служить рівень води в барабані котла. Зниження рівня нижче допустимих меж може привести до порушення циркуляції в екранних трубах (перекидання циркуляції) і, як наслідок, перепалу труб. При значному підвищенні рівня в барабані мож-

ливе захоплення частинок води паром, винесення її в пароперегрівач і турбіну, що викликає занос пароперегрівача і турбіни солями і веде до їх руйнування. У зв'язку з цим до точності підтримки заданого рівня пред'являються дуже високі вимоги. Регулювання живлення котлів малої продуктивності зазвичай здійснюється одноімпульсними регуляторами, керованими датчиками зміни рівня води в барабані. В котлах середньої та великої паропроductивності з малим водяним об'ємом застосовуються двоімпульсні регулятори живлення котла за рівнем води і витрати пара (рис. 1), а також тріімпульсні, які керують живленням котла за рівнем води, витрати пари і витрати живильної води.

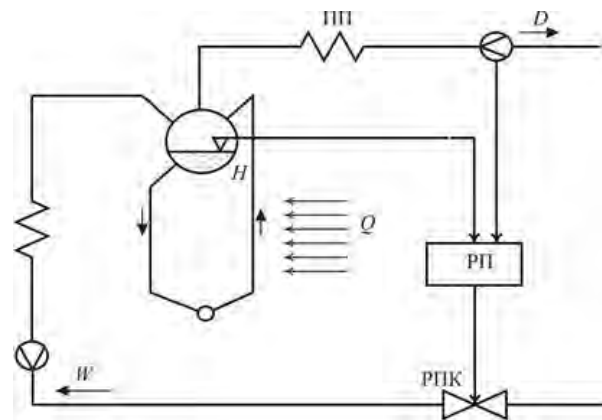


Рис. 1. Принципова схема АСР живлення:
 Е – економайзер; ПП – пароперегрівач;
 РП – регулятор; РПК – регулюючий клапан живлення

Граничні значення рівня в барабані котла визначаються на підставі спеціальних розрахунків на заводі-виробнику котельного обладнання і називаються уставками по спрацьовуванню захистів від підвищення і пониження рівня. Як правило, виконується двоступеневий захист від підвищення рівня. Перший ступінь захисту впливає на відкриття засувки аварійного сливу з барабана (аварійний скид); вона має свою уставку, яка є проміжною між нормальним рівнем і уставкою захисту від підвищення рівня. Другий ступінь захисту впливає на зупинку котла. Операції відключення котла і відкриття аварійного сливу при досягненні відповідних уставок виконуються пристроями захисту (у разі відключення) і блокування (відкриття-закриття аварійного сливу).

Таким чином, зона роботи АСР живлення обмежена уставкою захисту від зниження рівня в барабані котла, з одного боку, й уставкою відкриття аварійного сливу – з іншого. Ці межі зумовлюють безпеку роботи котла, перевищення їх тягне

за собою аварійну ситуацію. Варто врахувати, що для організації такого регулювання за газовим трактом розміщується швидкодіючий регулюючий орган і масовий витратомір газу, а за повітряним трактом із метою постійної його зміни – частотний регулятор і витратомір. Передбачається введення додаткового вимірювального каналу з визначення температури газів, що горять у факелі. Постійна зміна максимальної температури і нижчої теплотворної здатності газу, що надходить на спалювання, робить необхідним їх постійне коригування, адже необхідно підтримувати задану паропроодуктивність. Оптимальний режим котла має забезпечуватися корекцією повітря і газу для отримання максимальної температури при заданій паропроодуктивності або тепловим навантаженням. Організація такого режиму регулювання можлива лише на основі застосування систем екстремального регулювання. Це пов'язано з тим, що у разі спалювання в котлах горючих газів природного походження, теплофізичні параметри (склад, нижча теплотворна здатність) є змінними, що особливо посилюється вмістом баластних газів.

Тому постійне налаштування котлів за режимною картою не може забезпечити оптимальний режим роботи. Крім вирішення завдання теплової ефективності експлуатації котлів, також є актуальною задача зниження викидів CO₂ у навколишнє середовище у разі використання водневмісного газу.

З метою зниження питомих витрат енергії на валовий національний продукт необхідно на водогрійних і парових котлах, де це економічно доцільно, організувати всебічне використання сумішей горючих газів природного і штучного походження з мінливими енергетичними характеристиками, що дасть змогу:

- знизити споживання сертифікованого природного газу шляхом максимальної утилізації шахтного метану, сланцевих, доменних, коксових, генераторних, вуглеводневих, водневмісних газів, а також біогазів та газів піролізу;

- мінімізувати в промислових виробництвах утилізаційні технології спалювання горючих газів штучного походження на свічці;

- підвищити екологічну безпеку парових та водогрійних котлів;

- оптимізувати використання газів штучного походження між енергетичними і хіміко-технологічними виробництвами;

- знизити викиди SO₃, SO₂, NO₂, NO шляхом оптимізації процесів горіння в факелі і камері згоряння;

- забезпечити стійку взаємну роботу теплогенеруючого обладнання.

Спалювання горючих газів природного і штучного походження для отримання підігрітої води або технологічної пари виробляється в топках котельних агрегатів, де функцію камери згоряння виконує факел.

Спалювання газоподібного вуглеводневого палива будь-якого складу, а тим більше змінного в часі, вимагає забезпечення сталої та ефективної роботи факелів із характеристиками, що забезпечують задані енергетичні показники. До конструювання і застосування пальників, що працюють на газі штучного походження змінного складу, висувається низка вимог: пальники мають забезпечити повне і надійне спалювання палива з мінімальним надлишком повітря, бути компактними і зручними в експлуатації, відрізнятися великим терміном служби і мати невисоку вартість. Пальники мають створювати факел із необхідними теплообмінними характеристиками.

Забезпечити однакове дотримання перерахованих вимог неможливо, тому, насамперед, необхідно знати найбільш важливі з них для цієї парогенеруючої установки.

Забезпечення ефективності та екологічної безпеки використання палива як газопальникових пристроїв, так і всього, що використовує паливо агрегату, можливе шляхом зміни конструкції пальників, режимними методами або управлінням властивостями палива.

Утворення газоповітряної суміші та її займання залежать від зовнішніх і внутрішніх умов. Вплив конструктивних характеристик пальників на процес горіння можна назвати зовнішнім, а вплив характеристик самого палива – внутрішнім. Удосконалення конструкції пальників велось різними способами.

Особливістю роботи парових котлів на нафтопереробних підприємствах є використання в них як палива власних газів штучного походження змінного складу, склад яких значно коливається в часі і залежить від сировини, що переробляється і різної структури включених технологічних установок.

Очевидно, що найбільш оптимальним рішенням у таких випадках є використання пальників із регульованими параметрами, але є спроби забезпечити спалювання газів змінного складу і у звичайних пальниках.

Можна сказати, що підвищення ефективності спалювання газу штучного походження змінного складу в пальниках із примусовою подачею

повітря за допомогою зміни прохідного перетину газу завдяки роботі в дискретному режимі як із подачі газу, так і з подачі повітря, цілком можливе.

Управління спалюванням пального невідомої теплотворної здатності може бути забезпечене екстремальним регулятором. При заданій витраті пального шляхом зміни витрати окислювача (повітря) забезпечує стехіометричне співвідношення, що відповідає максимальній температурі продуктів згорання. Максимальна температура досягається за умови коефіцієнта надлишку повітря α , який дорівнює 1,0.

Альтернативою такого методу може служити визначення складу газу невідомої теплотворної здатності за допомогою газоаналізатора.

Висновки. Рішення завдання максимального забезпечення ефективності горіння й екологічних

норм в умовах постійної зміни якісного складу палива вимагає впровадження нових розрахункових методів і моделей. Такий метод має низку недоліків: ресурсномісткий, громіздкий, має великий час інерції і, як наслідок, запізнення. Тому він насилу інтегрується в автоматизовану систему управління. Для газоаналізаторів потрібні дані за переліком газів у суміші. Застосування газоаналітичних приладів ускладнюється тим, що такі гази містять у складі небажані компоненти, які призводять до прискореного зносу первинних приладів і виходу їх із ладу. Вартість системи росте зі збільшенням цього переліку.

Доцільно розглянути підходи до моделювання та результати натурних і чисельних експериментів у низці досліджень, які були отримані під час вивчення утворення сажі, фактично вуглецю.

Список літератури:

1. Davoudia M. The major sources of gas flaring and air contamination in the natural gas processing plants. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. Vol. 13. 2013. P. 7–19.
2. Niels Berghout Machteld van den Broek, André Faaij. Techno-economic performance and challenges of applying CO₂ capture in the industry: A case study of five industrial plants. *International Journal of Greenhouse Gas Control*. Vol. 17. 2013. P. 259–279.
3. Liu Hong, Peiwen Li, Kai Wang. Optimization of PEM fuel cell flow channel dimensions – Mathematic modeling analysis and experimental verification. *International Journal of Hydrogen Energy*. Vol. 38 (23). 2013. P. 9835–9846.
4. Tucakovica Dragan Possibilities for reconstruction of existing steam boilers for the purpose of using exhaust gases from 14 MW or 17 MW gas turbine. *Applied Thermal Engineering*. Vol. 56 (1–2). 2013. P. 83–90.
5. Rusinowski Henryk, Wojciech Stanek. Hybrid model of steam boiler. *Energy*. Vol. 35 (2). 2010. P. 1107–1113.
6. Vujak Janusz. Optimal control of energy losses in multi-boiler steam systems. *Energy*. 2009. Vol. 34 (9). P. 1260–1270.
7. Новиков О.Н. Энергоэкологическая оптимизация сжигания топлива в котлах и печах регулированием соотношения «топливо-воздух». *Промышленная энергетика*. 2000. № 5. С. 57–60.
8. Александров В.П. Паровые котлы малой и средней мощности. Москва, 1972. 200 с.
9. Вукалович М.П. Термодинамические свойства воды и водяного пара. Москва, 1955. 93 с.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГОРЕНИЯ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ГАЗОВ В ПАРОГЕНЕРИРУЮЩИХ УСТАНОВКАХ ЗА СЧЁТ ИЗМЕНЕНИЯ ОТНОШЕНИЯ ТОПЛИВО/ВОЗДУХ

Важной и одной из основных задач персонала является поддержание оптимального режима котла при данных условиях его работы, соответствующей максимально возможному значению КПД котла нетто. Поэтому возникает необходимость определения влияния статических характеристик котла, а именно: нагрузки, температуры питательной воды, воздушного режима топки и характеристики топлива – на показатели его работы при изменении значений перечисленных параметров.

Для решения научной задачи, которая заключается в поддержании оптимального соотношения при сжигании в воздухе углеводородного газа неизвестного состава за счет определения максимальной температуры горения и при обеспечении заданных характеристик факела пламени, при изменении текущего расхода воздуха необходимо определить статические и динамические характеристики объекта управления. Необходимо разработать математическую модель объекта управления и модели определения условной формулы углеводородного топлива по измеренным расходам воздуха и углеводородного газа и температуры пламени, методы реализации.

Ключевые слова: тепловая электростанция, паровой котел, автоматизация, математическая модель, передаточная функция.

ENHANCEMENT OF THE EFFICIENCY OF BURNING CARBOHYDRATED GASES IN POROGENERATOR INSTALLATIONS AT THE RATES OF REFRACTION OF THE FUEL / AIR

An important and one of the main tasks of the personnel is to support the optimal mode of the boiler under the conditions of its operation, which corresponds to the maximum possible value of the efficiency of the boiler net. That`s why requires to need to determine the influence of static characteristics of the boiler, namely: load, water temperature, air furnace mode and fuel characteristics – on its performance indicators when changing the values of these parameters.

To solve a scientific problem, which is maintenance of the optimal ratio, when burning in the air of an unknown gas composition of hydrocarbon gas by determining the maximum combustion temperature and providing the given characteristics of the flame of the flame when the current flow of air is changed, needs to determine the static and dynamic characteristics of the control object. It is necessary to develop a mathematical model of the control object and a model for determining the conditional formula of hydrocarbon fuel by measured air and hydrocarbon gas and flue temperature, methods for implementing efficient combustion in steam generating equipment by changing the fuel-air ratio to ensure maximum efficiency.

Key words: *thermal power station, steam boiler, automation, fuel / air ratio, efficiency.*

Дуба І.Е.

Одеський національний політехнічний університет

Беглов К.В.

Одеський національний політехнічний університет

МОДЕЛЮВАННЯ ВОДОГРІЙНИХ КОТЛІВ ПРИ ГЛИБОКИХ ЗБУРЕННЯХ ЗА ТЕПЛОТВОРНОЮ СПРОМОЖНІСТЮ ПАЛИВА

Використання біогазу є одним із перспективних напрямів розвитку енергетики України, але заміна природного газу на біогаз викликає низку проблем при експлуатації теплогенеруючого обладнання. Основною проблемою є коливання складу газу, що йде на горіння. Через різний склад газу відбуваються значні коливання витрат повітря і, як наслідок, змінюються властивості газоповітряного тракту і теплообмінних процесів. Розглянуто вплив зміни теплотворної спроможності палива, що подається до топкового пристрою на потужність водогрійної котельні. Заради досягнення поставленої мети вдосконалено математичну модель спалювання газоподібного палива шляхом врахування нелінійної залежності кількості тепла, що подається до топкового пристрою, та врахування зміни умов теплопередачі при значних коливаннях витрати димових газів. На базі розробленої імітаційної моделі 3 котлів КВГМ-50 проаналізовані динамічні характеристики у вигляді кривих розгону, отриманих при збуренні зміни теплотворної спроможності палива.

Ключові слова: біогаз, водогрійні котли, глибоке збурення, перехідний процес.

Постановка проблеми. Нині активно ведуться дослідження з використання поновлюваних джерел енергії. Зокрема, розглядаються питання використання як палива біогазу, отриманого шляхом переробки органічних відходів сільськогосподарської діяльності. Заміна природного газу на біогаз викликає низку проблем під час експлуатації теплогенеруючого обладнання.

Основною такою проблемою можна вважати значні коливання складу газу, що йде на горіння. Це викликає значні коливання витрати повітря і, як наслідок, зміну аеродинамічних властивостей газоповітряного тракту і теплообмінних процесів в ньому [1, с. 44–52].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження по спалюванню біопалива в котельних установках проводяться досить давно. Вже створено та експлуатується багато котельних установок, які використовують як основне паливо біогаз чи рідке біопаливо. Проте ті котли, що експлуатуються, вже розраховані на спалювання біогазу, причому вважається, що склад палива не змінюється.

Дослідження спалювання несертифікованого палива, до якого належить біогаз, проводились в обмеженій кількості робіт.

Так, математична модель спалювання несертифікованого палива розглянута у роботі М.В. Максимова, В.Ф. Ложечникова, Т.С. Добровольська,

А.В. Бондаренко [1, с. 44–52]. Проте як паливо розглянуто попутний нафтовий газ, який спалюється в паровому котлі.

У певних роботах [2, с. 32–36; 3, с. 79–84] показаний вплив складу палива на умови тепловіддачі у хвостових поверхнях нагріву котлів. Також, як й у попередній роботі, приклад був наведений для газу, теплотворна спроможність якого більша, ніж у природного газу.

Якщо ж спалювати газ із теплотворною спроможністю, меншою за природний газ, то як це показано в роботах таких авторів, як А.В. Лисюк і К.В. Беглов [4; 5], необхідно збільшувати площу теплообмінної поверхні з метою забезпечення постійної потужності котла.

Цього можна досягнути, використовуючи наявне теплогенеруюче обладнання, якщо включити або відключити його за необхідності.

Постановка завдання. Метою є дослідити вплив зміни кількості теплоти, що подається до топкового пристрою на потужність водогрійної котельні, зрівняти моделі котлів при глибоких збуреннях за кількістю теплоти.

Виклад основного матеріалу дослідження. Котельний агрегат представляється у виді теплообмінника. Основні рівняння, які описують процеси теплообміну в котлі, наведені в роботі «Водогрійна котельня як об'єкт керування потужності» [6, с. 109–115].

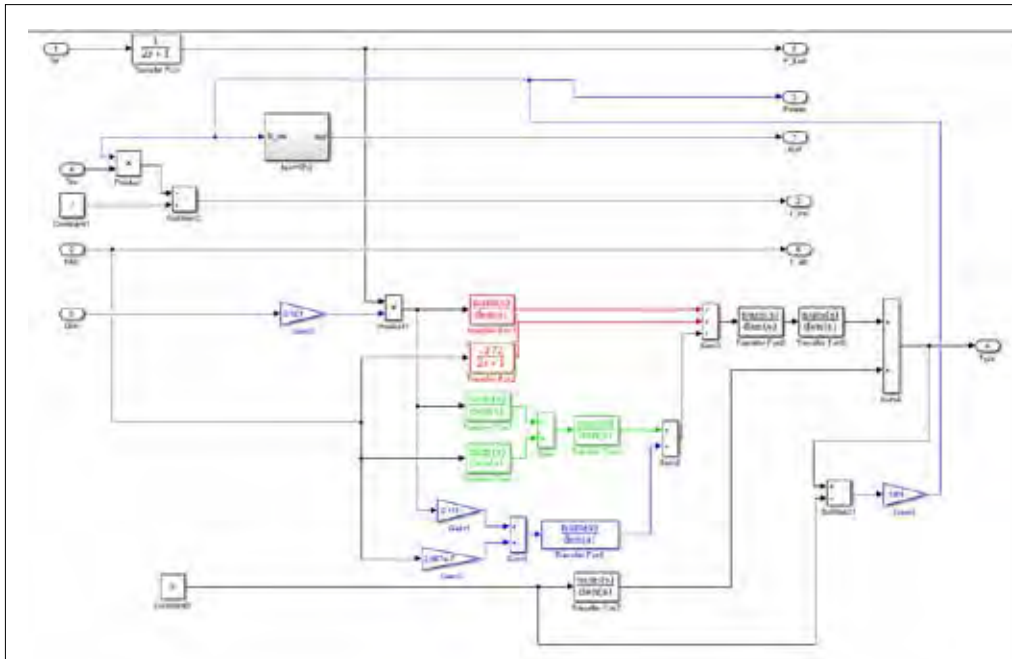


Рис. 1. Схема моделювання водогрійного котла

Кількість теплоти, що сприймається в конвективній частині залежно від витрати димових газів та кількості тепла, яке надійшло з радіаційної частини, описується рівняннями:

$$\Delta Q_F - c\bar{g}_{a1}\Delta M = \left(1 + \frac{M_c}{k_s}\right)\Delta Q_1 + \frac{m_1c}{k_s} \frac{dQ_1}{dt}, \quad (1)$$

або

$$\frac{k_s}{k_s + M_c}\Delta Q_F - \frac{k_s c\bar{g}_{a1}}{k_s + M_c}\Delta M = \Delta Q_1 + \frac{m_1c}{k_s + M_c} \frac{dQ_1}{dt}, \quad (2)$$

тут коефіцієнт $\frac{m_1c}{k_s + M_c} = T$ має розмірність часу.

де

- ΔQ_F – тепловиділення в топці;
- c – питома теплоємність;
- ΔM – витрата води через котел;
- \bar{g}_{a1} – температура газів;
- k_s – коефіцієнт.
- m_1 – маса води в котлі;
- M_c – витрата води;
- ΔQ_1 – тепловий потік.

Для аналізу процесів, що відбуваються в конвективній частині котла, скористуємось рівняннями: необхідно, передусім, визначити температуру газів на виході з першої частини. Відповідні залежності можуть бути отримані з рівняння (2), якщо в ньому у відповідності з (1) виразити ΔQ_1 у вигляді функції $\Delta \bar{g}_{a1}$. Після ділення на k_s одержуємо:

$$\frac{1}{k_s + M_c}\Delta Q_F - \frac{c\bar{g}_{a1}}{k_s + M_c}\Delta M = \Delta \bar{g}_{a1} + T_1 \frac{d\bar{g}_{a1}}{dt}, \quad (3)$$

або після скорочення

$$\frac{a_1}{k_s}\Delta Q_F - \frac{b_1}{k_s}\Delta M = \Delta \vartheta_1 + T_1 \frac{d\vartheta_1}{dt}, \quad (4)$$

Якщо замість ΔM задана зміна коефіцієнту надлишку повітря, то за аналогією до (29) можна записати

$$\frac{a_1 - b_1k_Q}{k_s}\Delta Q_F - \frac{b_1k_a}{k_s}\Delta \pm = \Delta Q_1 + T_1 \frac{dQ_1}{dt}, \quad (5)$$

Для конвективних поверхонь нагріву справедливі рівняння:

теплового балансу на боці газу, що гріє:

$$M_{Ge}c_G\vartheta_{Ge} - M_{Ga}c_G\vartheta_{Ga} = Q + m_Gc_G \frac{d\vartheta_{Gm}}{dt}, \quad (6)$$

балансу речовини на стороні газів:

$$M_{Ge} = M_{Ga}, \quad (7)$$

теплопередачі в системі «газ, що гріє, – труба» конвекцією

$$Q = k_4M_G^{0.33}(\vartheta_m - \theta_m), \quad (8)$$

Вихідна величина першої частини котла $\Delta M_1 = \Delta M$ та $\Delta \vartheta_{a1}$ є вхідною величиною для другої частини, тобто

$$\Delta M_2 = \Delta M_1 \text{ і } \Delta \vartheta_{e2} = \Delta \vartheta_{a1}, \quad (9)$$

Написавши означені рівняння для малих відхилень і виключивши члени, які належать до статичного режиму, з (6) і (7) при $\vartheta_{m2} = 0.5(\vartheta_{e1} + \vartheta_{a2})$ одержуємо

$$c\vartheta_{e2}\Delta M_G + \bar{M}_G c \Delta \vartheta_{e2} - c\bar{g}_{a2}\Delta M - \bar{M}_G c \Delta \vartheta_{a2} = \Delta Q_2 + \frac{mc}{2}(\Delta \vartheta'_{e2} + \Delta \vartheta'_{a2}), \quad (10)$$

та з (8)

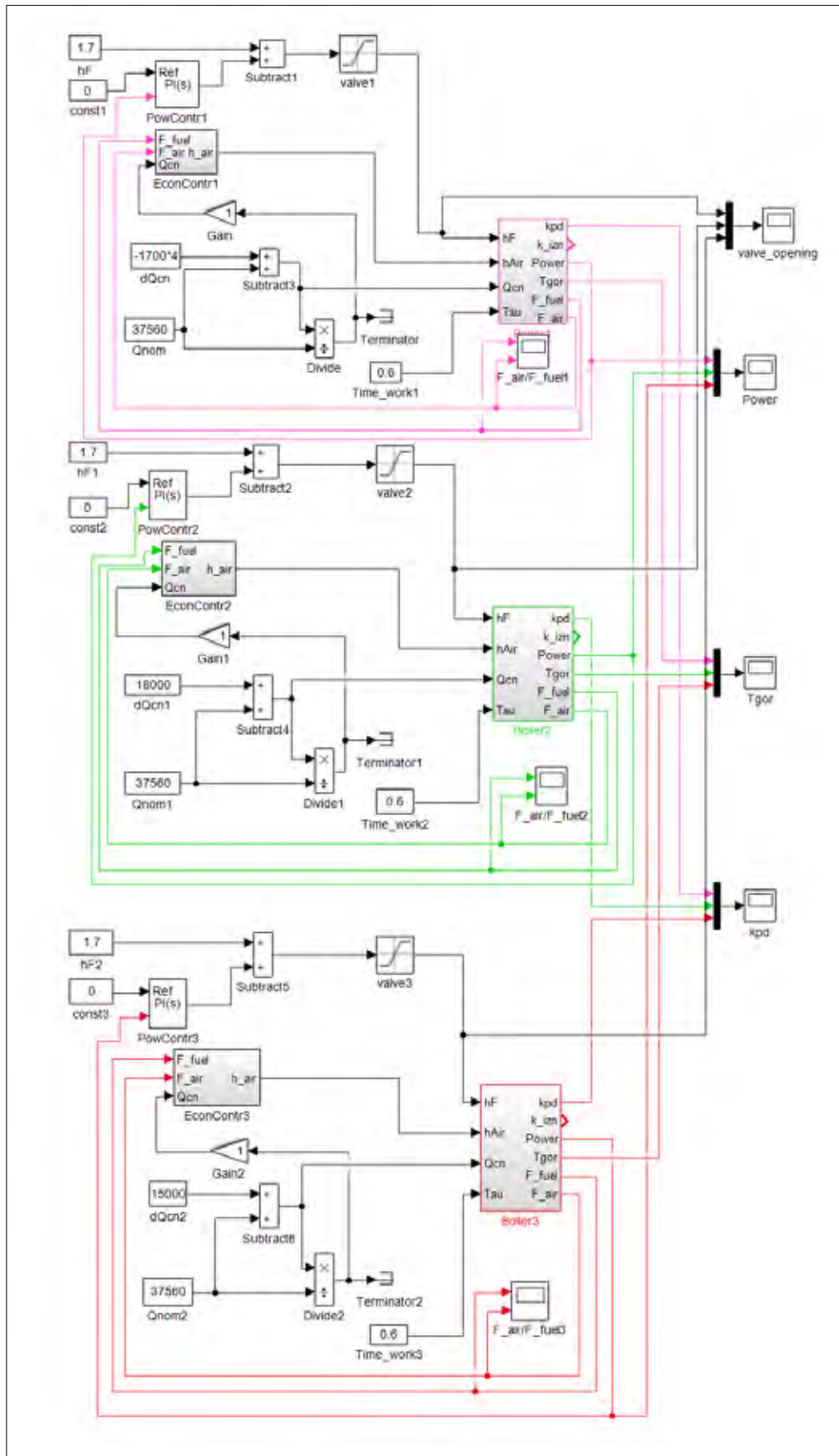


Рис. 2. Схема моделювання трьох водогрійних котлів при подачі на них різних збурень по тепловій спроможності палива

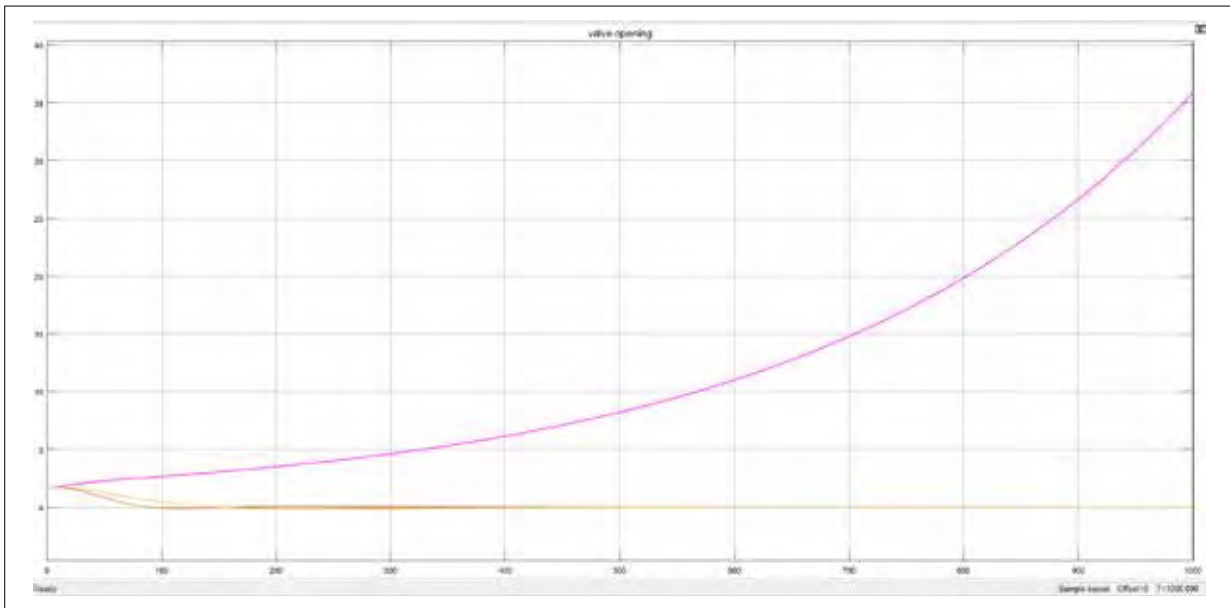


Рис. 3. Відкриття клапану

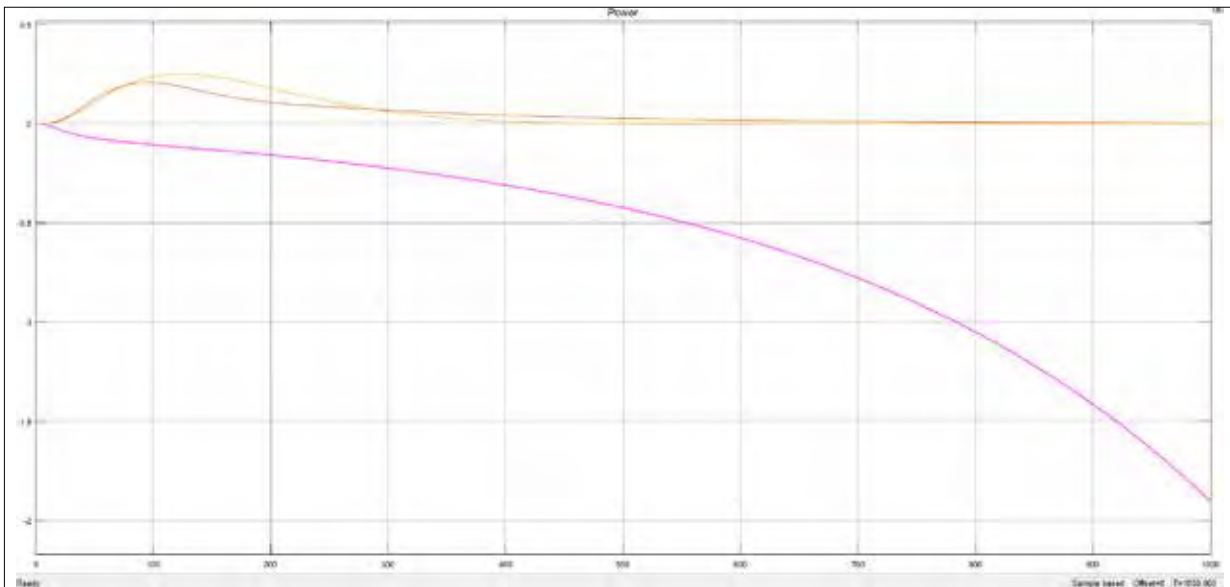


Рис. 4. Процес встановлення потужності на рівень норми після різних збурень

$$\Delta Q_2 = 0.33k_4 \bar{M}_G^{0.33} \frac{\bar{g}_{e2} + \bar{g}_{a2} - 2\theta_m}{2\bar{M}_G} \Delta M + 0.5k_4 \bar{M}_G^{0.33} (\Delta g_{e2} + \Delta g_{a2})$$

Реалізація розглянутої моделі з урахуванням роботи «Водогрійна котельня як об'єкт керування потужності» [6, с. 109–115] зроблено за допомогою частини схеми, наведеної на рисунку 1.

Входами моделі є Q_{sp} – відхилення теплотворної спроможності палива, hF – відхилення витрати палива, $hAir$ – відхилення витрати повітря. Вихідним параметром моделі є температура води на виході з котла.

В роботі було досліджено, чи зможе регулятор потужності при різних збуреннях теплового

навантаження встановити вихідну потужність на рівень норми.

На рисунку 3 показано, як відкритий клапан.

Рис. 4 показує, як поводить себе потужність при різних збуреннях.

Як видно з графіка, регулятор добре компенсує збільшення теплотворної здатності палива, але збурення зменшенням теплотворної здатності палива компенсується, якщо величина збурення не перевищує 15% від номінального значення. Це підтверджує дані, які наведені у роботі [4], і пов'язано з обмеженням пропускної здатності регулюючого органу.

Висновки. В роботі розглянуто вплив теплотворної спроможності палива на статичні та динамічні властивості водогрійного котла.

Отримала подальший розвиток математична модель водогрійного котла: відомі лінійні диференціальні рівняння були доповнені нелінійною залежністю їхніх коефіцієнтів від величини збурення теплотворною спроможністю палива.

Виявлено, що у разі збільшення теплотворної спроможності палива регулятор потужності добре компенсує збурення, але збурення зменшенням теплотворної здатності палива компенсується, якщо величина збурення не перевищує 15% від номінального значення, це пов'язано з обмеженням пропускної здатності регулюючого органу.

Список літератури:

1. Maksimov M.V., Lozhechnikov V.F., Dobrovolskaya T.S., Bondarenko A.V. Mathematical model of non-certified burning fuels. East European journal of advanced technologies. 2014. Vol. 2. No8 (68). P. 44–52. URL: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/22420/21760>.
2. Brunetkin O.I., Gorban S.O. Heat transfer optimization of heat exchange surfaces of boiler equipment with decrease in consumption of combustion products. Proceedings of the Odessa Polytechnic University. 2017. Vol. 3(53). P. 32–36.
3. Brunetkin O.I., Gusak A.V. Determination of the range of change of the convective heat transfer coefficient during the burning of alternative types of gaseous fuel. Proceedings of the Odessa Polytechnic University. Vol. 2(46). P. 79–84.
4. Лысюк А.В. Усовершенствование АСУ барабанного котла для сжигания горючих искусственных газов. Автоматика–2017: XXIV Міжнародна конференція з автоматичного управління (м. Київ, Україна, 13–15 вересня 2017 р.). Київ, 2017.
5. Лысюк А.В., Беглов К.В. Оптимизация работы группы котельных агрегатов при сжигании несертифицированного топлива. Автоматика–2017: XXIV Міжнародна конференція з автоматичного управління (м. Київ, Україна, 13–15 вересня 2017 р.). Київ, 2017.
6. Вовк І.В., Дуба І.Е., Конушбаєва Т.В., Беглов К.В. Водогрійна котельня як об'єкт керування потужності. Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. 2018. Том 29 (68). № 3. Ч. 1. С. 109–115.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОДОГРЕЙНЫХ КОТЛОВ ПРИ ГЛУБОКИХ ВОЗМУЩЕНИЯХ ПО ТЕПЛОТВОРНОЙ СПОСОБНОСТИ ТОПЛИВА

Использование биогаза является одним из перспективных направлений развития энергетики Украины, но замена природного газа биогазом вызывает ряд проблем при эксплуатации теплогенерирующего оборудования. Основной проблемой являются колебания состава газа, идущего на горение. Из-за различного состава газа происходят значительные колебания расхода воздуха и, как следствие, меняются свойства газозоудушного тракта и теплообменных процессов. Рассмотрено влияние изменения теплотворной способности топлива, подаваемого к топочному устройству на мощность водогрейной котельной. Для достижения поставленной цели усовершенствована математическая модель сжигания газообразного топлива путем учета нелинейной зависимости количества тепла, подаваемого к топочному устройству, и учета изменения условий теплопередачи при значительных колебаниях расхода дымовых газов. На базе разработанной имитационной модели 3-х котлов КВГМ-50 проанализированы динамические характеристики в виде кривых разгона, полученных при возбуждении изменения теплотворной способности топлива.

Ключевые слова: биогаз, водогрейные котлы, глубокое возмущение, переходный процесс.

MODELING OF WATER-HEATING BOILERS UNDER DEEP PERTURBENCES ON THE HEATING CAPACITY OF FUEL

The use of biogas is one of the promising areas for the development of the energy sector in Ukraine, but the replacement of natural gas with biogas causes a number of problems in the operation of heat generating equipment. The main problem is the fluctuation of the composition of the gas going to the combustion. Through a different composition of gas, significant fluctuations in air flow occur and, as a result, the properties of the gas-air duct and heat exchange processes change. The influence of the change in the calorific value of the fuel supplied to the combustion device on the capacity of a hot-water boiler is considered. To achieve this goal, the mathematical model of combustion of gaseous fuel has been improved by taking into account the non-linear dependence of the amount of heat supplied to the combustion device and taking into account changes in heat transfer conditions with significant fluctuations in flue gas flow. On the basis of the developed simulation model of 3 boilers KVGM-50, dynamic characteristics were analyzed in the form of acceleration curves obtained by initiating changes in the calorific value of the fuel.

Key words: biogas, water boilers, deep perturbation, transient process.

УДК 519.21

Дубко В.А.

Таврический национальный университет имени В.И. Вернадского

ПЕРВЫЕ ИНТЕГРАЛЫ УРАВНЕНИЙ ИТО СО СЛУЧАЙНЫМИ КОЭФФИЦИЕНТАМИ И РАСШИРЕННОЙ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ ИТО

В статье рассмотрен алгоритм построения класса уравнений Ито, согласующихся с заданным первым интегралом, когда коэффициенты уравнений зависят от неконтролируемых возмущений. Доказывается, что исходную систему уравнений Ито можно дополнить, после чего расширенная система может иметь первый интеграл, зависящий от начальных и новых переменных. Рассмотрены примеры.

Ключевые слова: первый интеграл, инвариантность, уравнения Ито, управление, расширенные системы.

Введение. В теории управления важным является направление, связанное с выяснением возможности обеспечения существования сохраняющихся функционалов (жизненно важных показателей) от части динамических переменных, характеризующих состояния системы, их нечувствительности к возмущениям: задача об инвариантности с вероятностью единица.

Мы исследуем этот вопрос на примере теории первых интегралов системы стохастических дифференциальных уравнений (СДУ) Ито. Приведем и докажем, опираясь на наши предыдущие работы, теоремы о классах СДУ, согласующихся с наперед заданными первыми интегралами.

Исследования в этом направлении были первоначально проведены в работе [2]. В дальнейшем подобные исследования продолжены в работах других авторов, например, [7]. В [7] приведены и ссылки на работы, связанные с применением теории первых интегралов в задачах программного управления.

Первые интегралы уравнений Ито

Пусть $x(t)$ – решение системы СДУ Ито

$$dx(t) = a(x(t); t)dt + b_k(x(t); t)dw_k(t), \quad (1)$$

$$x(t; x(0))|_{t=0} = x(0), \quad k = \overline{1, m},$$

где $x(t)$, $b_k(x; t)$, $a(x; t)$ – n мерные векторы, $w_k(t)$ – независимые винеровские процессы.

В работе [2] было введено понятие первого интеграла системы СДУ Ито как неслучайной скалярной функции $u(t, x)$, стохастический полный дифференциал от которой равен нулю:

$$du(x(t; x(0)); t) = 0, \quad \forall x(0) \in D \subset \mathbb{R}^n, \quad \forall t \in [0, T], \quad (2)$$

где D – односвязная область, которую, если не приводятся дополнительные ограничения, отождествляем со всем пространством.

Наличие первого интеграла означает, что с вероятностью 1 любая траектория решения $x(t; x(0))$ уравнения (2) остается на гладком многообразии, $u(x; t) = const, \quad \forall x(0) \in \{x(0) | u(0, x(0)) = const\}$.

Уточнения и возможные расширения понятия первого интеграла для стохастических систем были приведены в работе [4, с. 106, 107].

Условия существования первого интеграла у системы СДУ Ито

Задачи о строении класса СДУ, для которого $u(x; t)$ – первый интеграл, относится к обратным, поскольку прямые задачи связывают с отысканием для заданных уравнений первых интегралов. В [3] доказано, что класс таких СДУ существует и является следствием теорем о первых интегралах уравнений Ито, приведенных в [2; 3].

Первоначально будем полагать, что:

L.1. Выполнены ограничения на коэффициенты уравнения (1), обеспечивающие существование и единственность решения [1].

L.2. $u(t, x)$ непрерывно дифференцируемая по t и дважды непрерывно дифференцируемая по компонентам вектора x .

Условие L.2. позволяет применять формулу Ито при нахождении полного дифференциала (2).

Теорема 1. При выполнении ограничений L условия

$$\begin{aligned} 1) & b_{i,k}(x; t) \frac{\partial u(x; t)}{\partial x_i} = 0; \quad \forall k = \overline{1, m}, \\ 2) & \frac{\partial u(x; t)}{\partial t} + \frac{1}{2} b_{i,k}(x; t) b_{j,k}(x; t) \frac{\partial^2 u(x; t)}{\partial x_i \partial x_j} = 0, \end{aligned} \quad (3)$$

являются необходимыми и достаточными для выполнения требования (2).

Доказательство. После применения формулы Ито к $u(t, x(t))$ приходим к равенству:

$$\begin{aligned}
 du(x(t);t) &= \frac{\partial u(x(t);t)}{\partial t} + \\
 &+ \frac{1}{2} b_{i,k}(x(t);t) b_{j,k}(x(t);t) \frac{\partial^2 u(x(t);t)}{\partial x_i \partial x_j} dt +, \\
 &+ b_{i,k}(x(t);t) \frac{\partial u(x(t);t)}{\partial x_i} dw_k(t) = 0; \forall k = \\
 &= \overline{1, m}; \forall x(0) \in D, \forall t \in [0, T)
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

Применив вновь формулу Ито к $u^2(t, x(t))$, с учетом (4) приходим к равенству:

$$\begin{aligned}
 du^2(x(t);t) &= 2u(x(t);t) du(x(t);t) + \\
 &+ \left(b_{i,k}(x(t);t) \frac{\partial u(x(t);t)}{\partial x_i} \right)^2 dt = \\
 &= \left(b_{i,k}(x(t);t) \frac{\partial u(x(t);t)}{\partial x_i} \right)^2 dt = 0
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

Требования обращения в «0» соответствующих выражений при dt в (5), и, как следствие коэффициентов при $dw_k(t)$, $\forall k = \overline{1, m}$, в (4) и приводит к равенствам (3), утверждению Теоремы.

Отметим, что по этой схеме производилось и установление необходимых и достаточных условий существования первых интегралов для уравнений Ито и при наличии пуассоновских возмущений [6, с. 46–47].

Для построения класса уравнений Ито, согласованных с наперед заданными выражениями для первых интегралов, опираясь на свойства матриц и представление о скалярном произведении, нам понадобится дополнительное условие:

L.3. $\frac{\partial b_{i,k}(x;t)}{\partial x_j}, \forall i, j = \overline{1, n}, k = \overline{1, m}$. – непрерывны и ограничены по совокупности переменных $x; t$.

Теорема 2. [2; 3] Пусть выполнены ограничения L. Тогда для того чтобы функция $u(t, x)$ была первым интегралом уравнения (1), необходимо и достаточно выполнения следующих равенств:

$$\begin{aligned}
 1) & (b_k(x;t), \nabla u(x;t)) = 0, \\
 2) & (e_0 + g(x;t), \square u(x;t)) = 0,
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

где $e_l, l = \overline{0, n}$ – набор ортогональных единичных векторов, (\cdot) знак скалярного произведения, ∇ – знак градиента, $\square = e_0 \frac{\partial}{\partial t} + \nabla$, и

$$g_i(x;t) = a_i(x;t) - \frac{1}{2} b_{j,k}(t;x) \frac{\partial}{\partial x_j} b_{i,k}(x;t). \tag{7}$$

Доказательство справедливости равенств (6) опирается на равенство (3.1), при преобразовании в равенстве (3.2) с учетом L.3:

Замечание 1. Если мы от уравнения Ито (1) перейдем к представлению Стратоновича (см., например, [3, с. 123]), то получим уравнение: $dx^s_i(t) = g_i(x^s(t);t)dt + b_{i,k}(x^s(t);t)dw_k(t)$, где $g_i(x^s(t);t)$ совпадает с выражением (7). И в этом представлении требование $du(x^s(t),t) = 0$ приводят к соотношениям (5) Теоремы 1.

О первых интегралах, зависящих от части переменных

Ограничения Теоремы 2 позволяют определить СДУ Ито, согласующихся с заданным набором первых интегралов, в том числе и тогда, когда первые интегралы зависят только от части компонент.

Рассмотрим систему стохастических уравнений: $dx(t) = a(x(t);y(t);t)dt + b_k(x(t);y(t);t)dw_k(t), k = \overline{1, m}, x(t)|_{t=0} = x(0)$, (8)

где $a(x;y;t), b_k(x;y;t) \in R^n; y \in R^{n_0}$, и полагаем, что $\forall u$ выполнены требования L.

Теорема 3. Для класса уравнений (8) с коэффициентами:

$$\begin{aligned}
 1) & b_k(x;y;t) \in \{q_{0,k}(x;y;t) \det B_k(x;y;t)\}, \\
 2) & a(x;y;t) \in \left\{ \begin{aligned} & q_0(x;y;t) C^{-1}(x;t) \det A(t;x) - \\ & - \frac{1}{2} (b_k(x;y;t), \nabla_x) b_k(x;y;t) \end{aligned} \right\},
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

где:

$$\begin{aligned}
 A(t;x) &= \begin{bmatrix} e_0 & e_1 & \dots & e_n \\ a_{1,0} & a_{1,1} & \dots & a_{1,n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n,0} & a_{n,1} & \dots & a_{n,n} \end{bmatrix}; C(x;t) = \det \begin{bmatrix} a_{1,1} & \dots & a_{1,n} \\ \dots & \dots & \dots \\ a_{n,1} & \dots & a_{n,n} \end{bmatrix} \neq 0, \\
 B_k(x;y;t) &= \begin{bmatrix} e_1 & \dots & e_n \\ q_{1,1} & \dots & q_{n,1} \\ \dots & \dots & \dots \\ q_{n-1,n} & \dots & q_{n-1,n} \end{bmatrix}, \begin{cases} a_{1,i} = q_{1,i} = \frac{\partial}{\partial x_i} u(x;t), i = \overline{1, n}; \\ a_{1,0} = \frac{\partial}{\partial t} u(x;t), \end{cases}
 \end{aligned}$$

а относительно всех остальных элементов матриц и скалярных функций $q_{0,k}(x;y;t), q_0(x;y;t)$ предполагается, что они выбраны так, чтобы были выполнены требования L, то функция $u(x;t)$ – первый интеграл системы (8): $du(x(t),t) = 0$.

Доказательство. Дифференциал берется для $u(x(t),t)$, поэтому y надо рассматривать как параметр. Дальнейшее доказательство есть следствие равенств Теоремы 3, определения скалярного про-

изведения и обращаемости в нуль определителя матрицы, элементы двух строк у которой совпадают [3, с.133–134].

Замечание 2. Отметим, что эта теорема связана и с определением условий сохранения $u(x(t);t)$ в случайных средах [5; 6, с. 52].

Замечание 3. Из определения B_k следует, что число независимых строк в матрицах B_k не может превышать $(n - 1)$. Следовательно, и число независимых первых интегралов $u_l(x;t)$ как неслучайных функций, связанных с уравнением Ито (1), не может превышать $(n - 1)$.

Замечание 4. Для автономной системы $a_{i,0} = \frac{\partial}{\partial t} u(x;t) = 0$. Поэтому необходимо перейти от матрицы $A(t;x)$ к матрице, у которой будут отсутствовать первый столбец и последняя строка матрицы $A(t;x)$.

О расширении системы СДУ на основе требования существования первых интегралов

Рассмотрим теперь вопрос о возможности дополнения (1) системой стохастических уравнений

$$dx^o_l(t) = a^o_l(x(t);x^o(t);t)dt + b^o_{l,k}(x(t);x^o(t);t)dw_k(t), l = \overline{1, n_0} \quad (10)$$

таким образом, чтобы полный стохастический дифференциал функции $u(t, x(t), x^o(t))$ был равен нулю:

$$du(x(t);x^o(t);t) = 0.$$

По-прежнему будем полагать, что выполнены условия L, но уже в расширенном пространстве и, соответственно, области $D(n + n^o), \forall t \in [0, T)$. В этом случае выводы Теоремы 1 приводят к равенствам, которые мы представим в таком виде:

$$\begin{aligned} \text{a)} & b^o_{l,k}(x;x^o;t) \frac{\partial u(x;x^o;t)}{\partial x^o_l} = -b_{l,k}(x;t) \frac{\partial u(x;x^o;t)}{\partial x_l}, \quad \forall k = \overline{1, m}. \\ \text{b)} & -a^o_l(x;x^o;t) \frac{\partial u(x;x^o;t)}{\partial x_l} = \frac{\partial u(x;x^o;t)}{\partial t} + \\ & + a_l(x;t) \frac{\partial u(x;x^o;t)}{\partial x_l} + \frac{1}{2} [b_{j,k}(x;t) b_{l,k}(x;t) \frac{\partial u(x;x^o;t)}{\partial x_j \partial x_l} + \\ & + b^o_{l,k}(x;x^o;t) b^o_{r,k}(x;x^o;t) \frac{\partial u(x;x^o;t)}{\partial x_l \partial x_r} + \\ & + b^o_{l,k}(x;x^o;t) b_{l,k}(x;t) \frac{\partial u(x;x^o;t)}{\partial x_l \partial x^o_l}] = f(x;x^o;t), \\ & i, j = \overline{1, n}; l, r = \overline{1, n^o}; \end{aligned} \quad (11)$$

Теорема 4. Класс уравнений (1), (10), согласованный с требованием (11), не пуст.

Доказательство. Действительно, в области, где для фиксированного $l, \frac{\partial u(x;x^o;t)}{\partial x^o_l} \neq 0$ ненулевые коэффициенты $b^o_{l,k}(x;x^o;t)$ могут быть выбраны для фиксированного l из равенства (11а):

$$b^o_{l,k}(x;x^o;t) = -\frac{1}{\tilde{n}_1} b_{l,k}(x;t) \frac{\partial u(x;x^o;t)}{\partial x_l} \left(\frac{\partial u(x;x^o;t)}{\partial x^o_l} \right)^{-1},$$

где \tilde{n}_1 – число коэффициентов $b^o_{l,k}(x;x^o;t) \neq 0$.

Подставив полученные выражения $b^o_{l,k}(x;x^o;t)$ в равенство б), находим и $a_l(x;x^o;t)$:

$$a_l(x;x^o;t) = \frac{1}{\tilde{n}_2} f(x;x^o;t) \left(\frac{\partial u(x;x^o;t)}{\partial x^o_l} \right)^{-1},$$

\tilde{n}_2 – количество коэффициентов $a_l(x;x^o;t) \neq 0$.

Замечание 4. Систему (1), (10) можно интерпретировать как модель двухуровневой иерархической системы.

Пример построения расширенной системы

Пусть $x(t) \in \mathbb{R}^2$ – решение системы (1). Предположим, что выполнены ограничения L как для (1), так и ее расширения (1), (10).

Поскольку в силу Теоремы 4 нет ограничений на размерность расширения, ограничимся примером построения СДУ (10) для дополнительной переменной $x^o(t) \in \mathbb{R}$ таким образом, чтобы в расширенном пространстве \mathbb{R}^3 существовал первый интеграл $u(x;x^o)$:

$$du(x(t);x^o(t)) = 0 \quad (12)$$

Т.к. $x(t) \in \mathbb{R}^2$, то существует класс СДУ (1), допускающих существование только единственного первого интеграла (Замечание 3). Выберем первый интеграл следующего вида (диффузия на кольцах):

$$u(x) = x_1^2 + x_2^2 \quad (13)$$

Перейдем к построению коэффициентов (1) с учетом ограничения (13).

В силу (13) $\frac{\partial}{\partial t} u(x) = 0, \frac{\partial}{\partial t} u(x, x^o) = 0$, то, учитывая Замечание 4 к Теореме 3, коэффициенты в уравнении (1) будут определяться равенствами:

$$\begin{aligned} b_k(x;t) &= \left\{ q_{0,k}(x;t) \det \begin{bmatrix} e_1 & e_2 \\ \frac{\partial u(x)}{\partial x_1} & \frac{\partial u(x)}{\partial x_2} \end{bmatrix} \right\} = \\ &= q_{0,k}(x;t) (e_1 \frac{\partial u(x)}{\partial x_2} - e_2 \frac{\partial u(x)}{\partial x_1}) \\ a(x;t) &= \left\{ q(x;t) \det \begin{bmatrix} e_1 & e_2 \\ \frac{\partial u(x)}{\partial x_1} & \frac{\partial u(x)}{\partial x_2} \end{bmatrix} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{2} (b_k(x;t), \nabla_x b_k(x;t)) \right\} = \\ &= q(x;t) (e_1 \frac{\partial u(x)}{\partial x_2} - e_2 \frac{\partial u(x)}{\partial x_1}) + \\ &+ q_{0,k}(x;t) \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u(x)}{\partial x_2} \frac{\partial}{\partial x_1} - \frac{\partial u(x)}{\partial x_1} \frac{\partial}{\partial x_2} \right) \times \\ &\quad \times [q_{0,k}(x;t) (e_1 \frac{\partial u(x)}{\partial x_2} - e_2 \frac{\partial u(x)}{\partial x_1})] \end{aligned} \quad (15)$$

Рассмотрим несколько вариантов представления коэффициентов из этого класса.

1. Пусть $k = 1$, $q_{0,k}(x;t) = 0,5$. Как следует из формул (14), (15), это соответствует системе:

$$\begin{aligned} dx_1(t) &= [q(x(t);t)2x_2(t) - 0,5x_1(t)] \\ dt + x_2(t)dw(t), \\ dx_2(t) &= [-q(x(t);t)2x_1(t) - 0,5x_2(t)] \\ dt - x_1(t)dw(t), \\ x(t; x(0))|_{t=0} &= x(0), x_1(t)|_{t=0} = \\ &= x_1(0)|_{t=0}, x_2(t) = x_2(0). \end{aligned}$$

Если $q(x,t) = 0$, то тогда:

$$\begin{aligned} dx_1(t) &= -0,5x_1(t)dt + x_2(t)dw(t), \\ dx_2(t) &= -0,5x_2(t)dt - x_1(t)dw(t). \end{aligned} \quad (16)$$

Дальше будем рассматривать эту систему. Это линейная система, ее решение можно найти в явном виде:

$$x(t) = \exp\{w(t)B\}x(0), \text{ где } B = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix}.$$

Т.к. $B^2 = -E$, где E — единичная матрица, то решение приводится к виду: $x(t) = [\cos w(t) + B \sin w(t)]x(0)$. Покомпонентная запись этого представления имеет вид:

$$\begin{aligned} x_1(t) &= [x_1(0) \cos w(t) + x_2(0) \sin w(t)], \\ x_2(t) &= [x_2(0) \cos w(t) - x_1(0) \sin w(t)]. \end{aligned} \quad (17)$$

Опираясь на (17), проверяем, что $u(x(t)) = (x(t), x(t)) = (x(0), x(0))$ — первый интеграл для (16).

2. Перейдем к расширению (16) до системы вида (1), (10), у которой должен существовать первый интеграл $u(x; x^o)$ в \mathbb{R}^3 .

Расширенная система (1), (10) в данном случае имеет вид:

$$\begin{cases} dx_1(t) = -0,5x_1(t)dt + x_2(t)dw(t), \\ dx_2(t) = -0,5x_2(t)dt - x_1(t)dw(t), \\ dx^o(t) = a^o(x(t); x^o(t))dt + b^o(x(t); x^o(t))dw(t) \end{cases} \quad (18)$$

$$x^o(t; x(0); x^o(0))|_{t=0} = x^o(0), x(t; x(0))|_{t=0} = x(0).$$

Условие (12) для расширенной системы приводит при заданных выше предположениях с привлечением выводов Теоремы 4 к равенствам:

$$x_2 \frac{\partial u(x; x^o)}{\partial x_1} - x_1 \frac{\partial u(x; x^o)}{\partial x_2} = -b^o(x; x^o) \frac{\partial u(x; x^o)}{\partial x^o}. \quad (19)$$

$$\begin{aligned} & -\frac{1}{2} [x_2 \frac{\partial}{\partial x_1} b^o(x; x^o) - x_1 \frac{\partial}{\partial x_2} b^o(x; x^o)] \frac{\partial u(x; x^o)}{\partial x^o} + \\ & -\frac{1}{2} b^o(x; x^o) \frac{\partial}{\partial x^o} b^o(x; x^o) \frac{\partial u(x; x^o)}{\partial x^o} = \\ & = -a^o(x; x^o) \frac{\partial u(x; x^o)}{\partial x^o}. \end{aligned} \quad (20)$$

Из (19), (20) следует, что

$$b^o(x; x^o) = -[x_2 \frac{\partial u(x; x^o)}{\partial x_1} - x_1 \frac{\partial u(x; x^o)}{\partial x_2}] [\frac{\partial u(x; x^o)}{\partial x^o}]^{-1} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} a^o(x; x^o) &= \frac{1}{2} [x_2 \frac{\partial}{\partial x_1} b^o(x; x^o) - x_1 \frac{\partial}{\partial x_2} b^o(x; x^o)] + \\ & + \frac{1}{2} b^o(x; x^o) \frac{\partial}{\partial x^o} b^o(x; x^o) \end{aligned} \quad (22)$$

Как видим, $a^o(x; x^o)$ зависит от вида $b^o(x; x^o)$. Но $b^o(x; x^o)$ зависит от постулируемого вида первого интеграла $u(x; x^o)$. Выбирая, например, $u(x; x^o) = x_1x_2 + x^o$, и подставив эту функцию в (21), (22), находим: $b^o(x; x^o) = -[x_2^2 - x_1^2]$, $a^o(x; x^o) = -\frac{3}{2}[x_2^2 - x_1^2]$.

Следовательно, с такими коэффициентами расширенная система (10) обладает первыми интегралами $u(x) = x_1^2 + x_2^2$, и $u(x; x^o) = x_1x_2 + x^o$.

3. В данном примере появляется возможность выяснить, будет ли существовать и какой будет иметь вид первый интеграл расширенной системы, если $b^o(x; x^o)$ задано. Например, выберем

$$b^o(x; x^o) = b^o = const. \quad (23)$$

Тогда в силу (22),

$$a^o(x; x^o) = 0. \quad (24)$$

Остается только требование (21):

$$\begin{aligned} & x_2 \frac{\partial u(x; x^o)}{\partial x_1} - x_1 \frac{\partial u(x; x^o)}{\partial x_2} + \\ & + b^o \frac{\partial u(x; x^o)}{\partial x^o} = 0 \end{aligned}$$

Решение этого уравнения, явно зависящее от x, x^o , может быть представлено в таком виде:

$$c + x^o - b^o \arctg \frac{x_2}{x_1} = u(x; x^o), \quad (25)$$

где c — постоянная.

Проверить, является ли функция $u(x; x^o)$ первым интегралом для (18) с коэффициентами (23), (24), можно и непосредственно, подставив решения (17) и $x^o(t) = x^o(0) + b_0w(t)$ (т.к. в (18) $dx^o(t) = b^o dw(t)$) в (25) и выполнив необходимые тригонометрические преобразования.

Заключение. Требование обеспечения устойчивости определенных показателей системы — одна из задач управления. Приведенные Теоремы о классе СДУ, допускающие существование первых интегралов, можно рассматривать как основу выбора управляющих элементов для динамической системы, позволяющих с вероятностью единицы сохранить требуемые показатели при сильных возмущениях. Доказанные в работе Теоремы указывают и на наличие резерва, вариативности в выборе таких управлений.

Список літератури:

1. Гихман И.И. Стохастические дифференциальные уравнения и их приложения / И.И. Гихман, А.В. Скороход. Киев: Наук. думка, 1982. 612 с.
2. Дубко В.А. Первый интеграл системы стохастических уравнений. Киев: Ин-т математики АН УССР, 1978. 22 с.
3. Дубко В.А. Вопросы теории и применения стохастических дифференциальных уравнений. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1989. 185 с.
4. Дубко В.А. В поисках скрытого порядка / В.А. Дубко, Ф.Н. Рянский, Э.М. Сороко, В.Н. Шалпо, В.В. Юшманов. Владивосток: Дальнаука, 1995. 118 с.
5. Дубко В.А. Интегральные инварианты уравнений Ито и их связь с некоторыми задачами теории случайных процессов. Док. НАН Украины, 2002, № 1. С. 24–29.
6. Дубко В.А. Стохастические дифференциальные уравнения. Избранные разделы. Киев, 2012. 67 с.
7. Карачанская Е.В. Построение программных управлений с вероятностью 1 для динамической системы с пуассоновскими возмущениями. Вестник Тихоокеанского государственного университета. № 2(21). 2011. С. 51–60.

**ПЕРШІ ІНТЕГРАЛИ РІВНЯНЬ ІТО З ВИПАДКОВИМИ КОЕФІЦІЄНТАМИ
ТА РОЗШИРЕНОЇ СИСТЕМИ РІВНЯНЬ ІТО**

У статті розглядається алгоритм побудови класу рівнянь Іто, що узгоджуються із заданим першим інтегралом, коли коефіцієнти рівнянь залежать від неконтрольованих збурень. Доводиться, що початкову систему рівнянь Іто можна доповнити, після чого розширена система може мати перший інтеграл, що залежить від початкових та нових змінних. Розглянуті приклади.

Ключові слова: перший інтеграл, інваріантність, рівняння Іто, керування, розширені системи.

**THE FIRST INTEGRALS OF THE ITO EQUATIONS WITH RANDOM COEFFICIENTS
AND OF THE EXTENDED SYSTEM OF ITO EQUATIONS**

In this paper we consider the algorithm for constructing the class of Ito equations that adapted with the given first integral, but with coefficients that depending on uncontrolled perturbations. It is proved that the initial system of Ito equations can be supplemented, after which the extended system can have the first integral of the initials and new variables. Examples are considered.

Key words: first integrals, invariance, Ito equations, management, extended systems.

Ермаков И.А.

Одесский национальный политехнический университет

Ложечников В.Ф.

Одесский национальный политехнический университет

УСОВЕРШЕНСТВОВАНАЯ СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ УРОВНЯ ВОДЫ С СИГНАЛОМ ПО РАЗНИЦЕ ТЕМПЕРАТУР В УСТАНОВКЕ ГЕНЕРИРОВАНИЯ ПАРА ЭНЕРГОБЛОКА ВВЭР-1000 АЭС

Генерирование насыщенного пара в энергоблоках АЭС с ВВЭР осуществляется в парогенераторах (четыре парогенератора на энергоблок). Важнейшим регулируемым параметром в ПГ АЭС, как и для котлов ТЭС, является уровень воды, от точности поддержания которого зависит качество пара и надёжность. Совершенствование автоматизированных систем управления технологическими процессами барабанных котлов средней мощности и энергоблоков АЭС является важнейшим средством повышения их эффективности и надёжности и одним из необходимых условий повышения качества и снижения себестоимости конечного продукта, повышения его конкурентоспособности как на внутреннем, так и на внешнем рынках, способствует экономическому росту и техническому престижу Украины.

Ключевые слова: автоматическая система регулирования, трёхимпульсная система регулирования, автоматизация, модель динамики.

Постановка проблемы. Эффективное управление барабанными котлами средней мощности и парогенераторами (ПГ) АЭС с ВВЭР в нормальных и аварийных режимах в значительной мере обеспечивает динамическую устойчивость системы регулирования как отдельного котлоагрегата, так и всего энергоблока. Важнейший параметр, от которого зависит выполнение этих функций, – уровень воды в барабанном ПГ, который должен поддерживаться на определённом нормированном значении. Работа двух рассматриваемых АСР взаимосвязана. Динамические свойства соответствующих объектов управления различны. В настоящее время каждая АСР настраивается индивидуально, как правило, экспериментально на действующем объекте, что при совместной работе не обеспечивает требуемых показателей качества регулирования.

Указанные причины приводят к необходимости разработки математической модели участка питания и исследования на ней совместной работы типовых схем регулирования и синтеза новых оптимальных многомерных АСР.

Анализ последних исследований и публикаций. В статье «Оптимальный ПИ-регулятор уровня воды в парогенераторе энергоблока АЭС с реактором ВВЭР-1000» [4] авторы (В.А. Демченко, А.А. Стопакевич, В.Ф. Ложечников) пришли к выводу, что в ряде парогенераторов сиг-

нал по расходу пара заменён сигналом по разности температур теплоносителя первого контура на входе и выходе реактора, что исключает необратимые потери давления пара на сужающем устройстве. Такая схема, уступая по качеству регулирования схеме с сигналом по расходу свежего пара, выполняет возложенные на неё функции. Расчёт указанных систем обоснован положением классической теории автоматического управления (схема регулирования с контуром инвариантности по основному возмущающему воздействию) и для их параметризации используются инженерные методы определения настроек регулятора [4, с. 1].

В настоящее время ведётся работа этими учёными, а именно по предложению новых моделей и методов качественного регулирования уровня, а также по улучшению уже известных разработанных систем регулирования. В вопросе выбора системы автоматического регулирования уровня нельзя не учитывать минимальные шансы на сбой и поломки. Поэтому проблема внедрения и испытания новых и улучшенных старых систем требует испытания на реальных объектах.

Формулирование целей статьи. Классическая трёхимпульсная система поддержания уровня не до конца обеспечивает полной или частичной независимости от приведённых возмущений. Поэтому необходимо провести анализ усовершенствованной АСР и классиче-

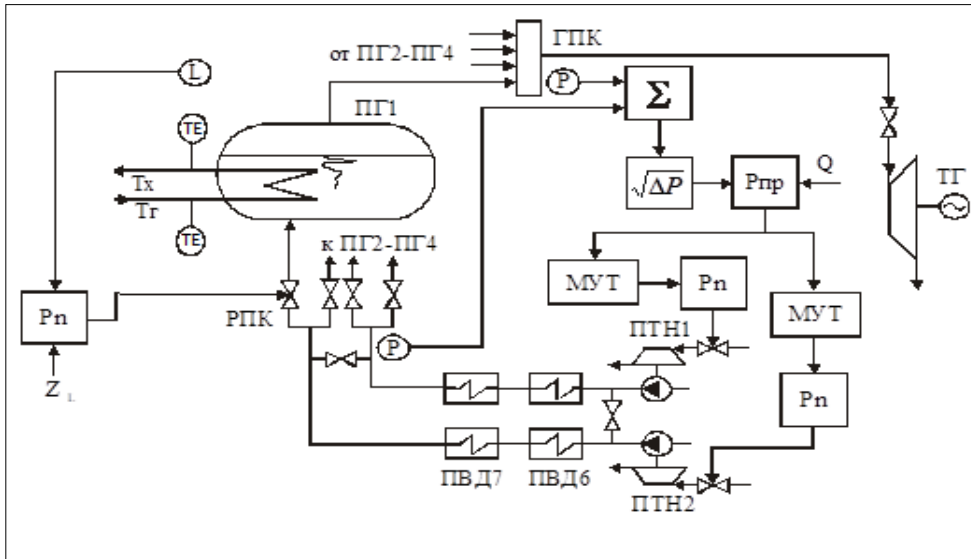


Рис. 1. Принципиальная схема автоматического регулирования производительности ПТН и питания ПГ

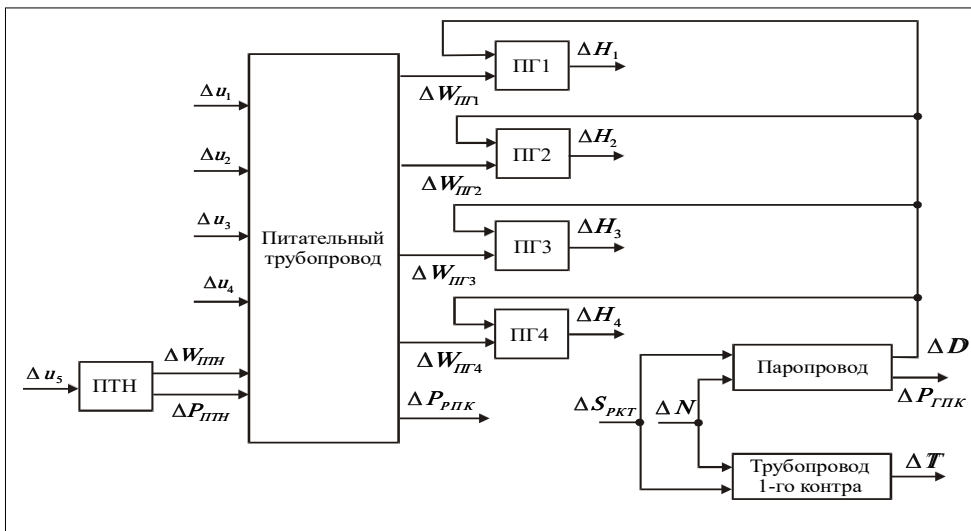


Рис. 2. Структурная схема участка питания парогенераторов АЭС с ВВЭР

скої тріхімпульсної систем автоматичного регулювання.

Изложение основного материала исследования. Участок питания парогенератора двухконтурных энергоблоков АЭС с ВВЭР является важнейшим элементом тепловой схемы. От его надёжной и экономичной работы зависит надёжность и экономичность работы всего энергоблока.

В участок питания входят (рис. 1): питательные турбонасосы (ПТН), питательные трубопроводы с двумя подогревателями высокого давления (ПВД) и регулирующими питательными клапанами (РПК) перед каждым парогенератором (ПГ), который обогревается теплоносителем первого контура энергоблока, паропроводы от ПГ до турбо-

генератора (ТГ) с главным паровым коллектором (ГПК). Управление этим оборудованием осуществляется двумя основными системами автоматического регулирования – трёхимпульсной автоматической системой регулирования (АСР) питания парогенератора, задачей которой является поддержание материального баланса между отводом пара, продувкой и подачей питательной воды и АСР производительности ПТН, которая изменяет расход питательной воды путём изменения числа его оборотов. Назначение её заключается в том, чтобы при изменении расхода питательной воды регулятором питания при изменении нагрузки блока регулирующей питательный клапан (РПК) сохранял неизменной степень открытия. При

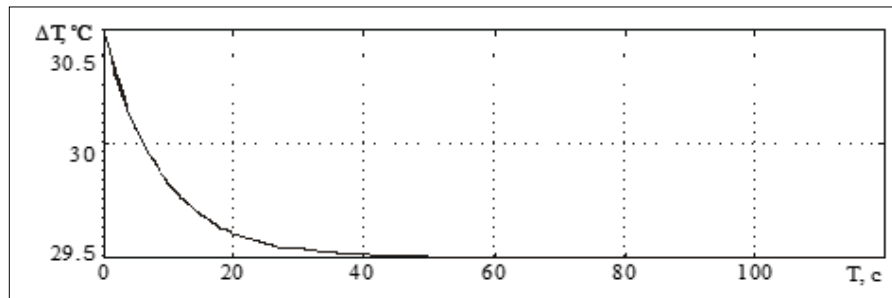


Рис. 3. Изменение разности температур теплоносителя первого контура

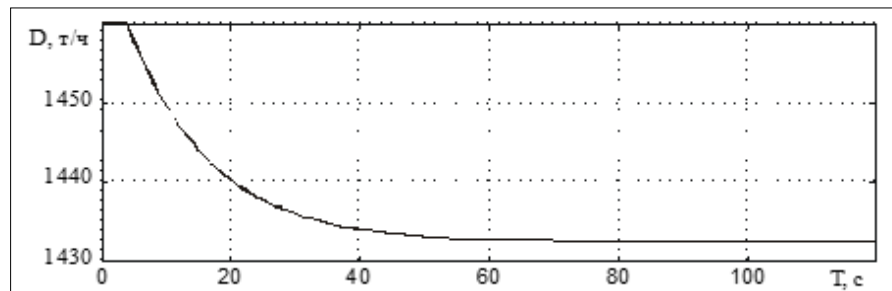


Рис. 4. Изменение расхода пара из парогенератора

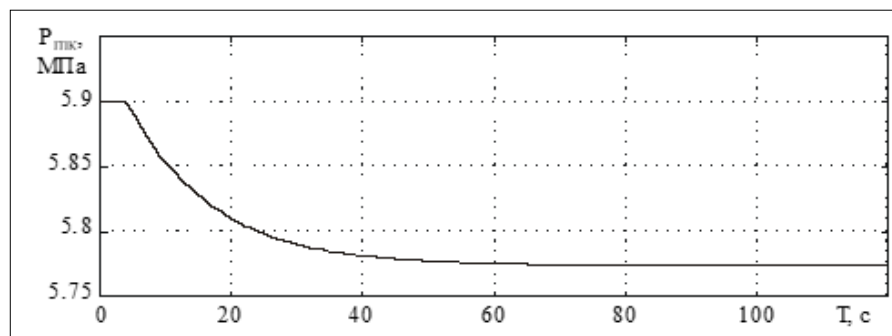


Рис. 5. Изменение давления пара в главном паровом коллекторе

такой работе РПК уменьшаются потери энергии на дросселирование и уменьшается его износ из-за уменьшения перепада давления на нём.

В настоящее время рассматриваемые АСР реализованы на основе локальных регуляторов системы «Каскад», или в случае применения цифровых управляющих комплексов программируются на основе типовых законов регулирования. Указанные причины приводят к необходимости разработки математической модели участка питания и исследования на ней совместной работы типовых схем регулирования и синтеза новых оптимальных многомерных АСР.

Регулятор производительности $R_{пр}$ пропорционально-интегрального действия получает сигнал, пропорциональный корню квадратному из $\Delta P = P_{РПК} - P_{ГПК}$ ($P_{РПК}$ – давление питательной воды перед РПК, $P_{ГПК}$ – давление пара ГПК), в качестве задающего сигнала на его вход поступает сигнал Q тепловой мощности петли, равной

$Q = (T_r - T_x) \cdot \sqrt{\Delta P}$ (T_r – температура теплоносителя первого контура перед ПГ, T_x – температура теплоносителя первого контура после ПГ). Регулятор воздействует на механизм управления турбиной (МУТ) регулятора скорости вращения R_n каждого из ПТН, что приводит к изменению расхода пара на приводную турбину, скорости её вращения и, соответственно, производительности насоса. В качестве сигнала Q используется максимальный сигнал из сигналов четырёх циркуляционных петель первого контура энергоблока. В АСР питания ПГ сигналы по расходу пара и питательной воды вводятся в регулятор с противоположными знаками и компенсируют друг друга. Сигнал по уровню воды в ПГ компенсируется сигналом задания. В этой схеме реализуется пропорциональный (П) закон регулирования с инвариантностью по возмущению расходом пара [1, с. 50].

Для рассматриваемых АСР в соответствии с принципиальной схемой автоматического регу-

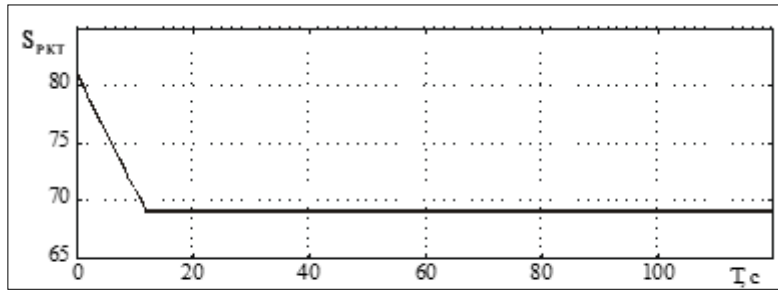


Рис. 6. Изменение положения регулирующих клапанов турбины

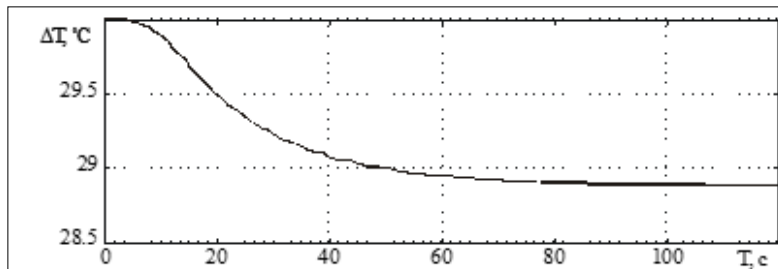


Рис. 7. Изменение разности температур теплоносителя первого контура

лирования (рис. 1) розроблена структурна схема участка питания барабанных парогенераторов (рис. 2). В схеме выделены следующие структурные элементы, которые отражают свойства реальных конструктивных элементов схемы участка питания барабанных парогенераторов: парогенераторы ПГ 1, 2, 3, 4, которые учитывают динамику изменения уровня пароводяной смеси в парогенераторе $\varnothing H$ при изменении расходов питательной воды $\varnothing W_{ПГ}$ и пара $\varnothing D$; питательный трубопровод, который является связующим элементом участка питания, учитывает динамику изменения расхода питательной воды в результате изменения положения РПК ($\varnothing u_1, \varnothing u_2, \varnothing u_3, \varnothing u_4$) и динамику изменения давления питательной воды перед регулируемыми питательными клапанами $\varnothing P_{РПК}$ в результате изменения производительности ПТН; питательный турбонасос, определяющий динамику изменения подачи питательной воды $\varnothing W_{ТНН}$ в парогенераторы через питательный трубопровод и изменение давления питательной воды $\varnothing P_{ТНН}$ на выходе ПТН в результате изменения положения регулирующих клапанов $\varnothing u_5$ приводной турбины ПТН; главный паропровод от парогенераторов до главного парового коллектора и трубопровод первого контура. Внутренним возмущением для участка питания является изменение тепловой мощности энергоблока $\varnothing N$, которое приводит к изменению количества генерируемого пара в парогенераторах и, как следствие, изменению расхода $\varnothing D$ и давления $\varnothing P$ пара в главном паропроводе. Изменение тепловой мощности

характеризуется изменением разности температур $\varnothing T$ горячей и холодной петель первого контура. В качестве внешнего возмущения принято изменение положения регулирующих клапанов турбины $\varnothing S_{РКТ}$, которое сопровождается резким изменением расхода пара через паропровод и изменением давления пара в ГПК. Изменение расхода пара через паропровод приводит к нарушению материального баланса между поступающей в ПГ питательной водой и отбираемым из него паром. Регулятор уровня, стремясь восстановить материальный баланс, изменяет расход питательной воды, что в свою очередь приводит к изменению условий теплообмена между пароводяной смесью в парогенераторе и теплообменным пучком первого контура. При этом изменяется разность температур теплоносителя первого контура. Поскольку процесс изменения разности температур имеет намного большую инерционность, чем скорость изменения расхода питательной воды, то при разработке математической модели участка питания для упрощения расчёта и уменьшения размерности математической модели влияние расхода питательной воды на разность температур теплоносителя первого контура и процесс генерации пара будет учитываться косвенно через каналы внутреннего возмещения по реактивности и внешнего – изменением расхода пара на главную турбину. В разработанной модели учитывается только один ПТН, поскольку их работа в автоматическом режиме синхронизирована МУТ. Также предполагается, что динамические

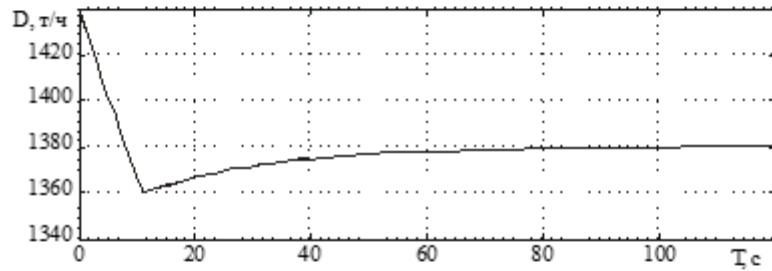


Рис. 8. Изменение расхода пара из парогенератора

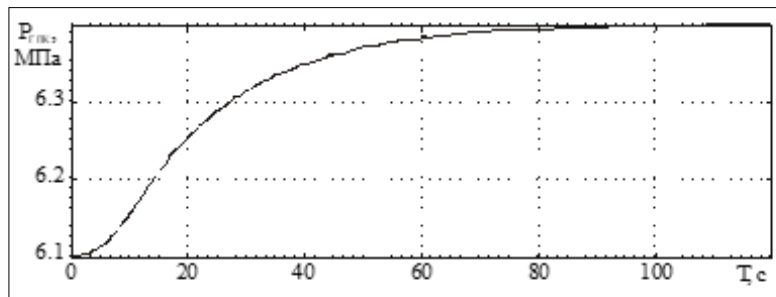


Рис. 9. Изменение давления пара в главном паровом коллекторе

свойства трубопроводов от РПК до ПГ одинаковы для всех четырёх парогенераторов. Сигнал по изменению разности температур необходим для определения задающего сигнала по тепловой мощности для регулятора производительности ПТН. Транспортное запаздывание введено в регулирующие каналы по уровню пароводяной смеси в парогенераторе и давлению питательной воды перед РПК на основании экспериментальных данных, и его проявление может быть объяснено нечувствительностью измерительных преобразователей, зоной нечувствительности регулятора и люфтами в кинематической схеме исполнительного механизма регулирующих органов.

Линеаризованные уравнения динамики элементов ММ будут получены либо аналитически, либо по экспериментальным кривым разгона на действующем оборудовании энергоблока с ВВЭР-1000. На рис. 3–5 приведены экспериментальные кривые разгона по разности температур теплоносителя первого контура, давлению и расходу пара при возмущении группой регулирующих кассет.

Основным внешним возмущением для участка питания является изменение положения регулирующих клапанов турбины (рис. 6) (РКТ), которое сопровождается резким изменением расхода пара в паропроводе (рис. 8) и инерционным изменением давления пара в ГПК и разности температур горячей и холодной петель первого контура (рис. 9, 7).

Величина возмущения составила 12% хода регулирующих клапанов, что соответствует изменению мощности энергоблока на 48 МВт. По разгонным характеристикам с учётом линейно нарастающего изменения положения регулирующих клапанов турбины аналогично тому, как были определены передаточная функция динамики ПТН и её численные значения, определяются вид и численные значения коэффициентов соответствующих передаточных функций.

Выводы. Полученная система дифференциальных уравнений промоделирована с помощью пакета прикладных программ “Matlab”.

Расчёт коэффициентов для полученных уравнений динамики был проведён применительно к энергоблоку с ВВЭР-1000 для номинального режима работы. Сравнение кривых разгона, полученных на модели, с имеющимися экспериментальными кривыми разгона показало хорошую адекватность модели.

С учётом определённых коэффициентов и системы матричных разностных уравнений может быть рассчитан многомерный оптимальный регулятор участка питания барабанного парогенератора ПГВ-1000. Полученная математическая модель также может быть использована для исследования переходных процессов в типовых системах регулирования уровня пароводяной смеси в парогенераторах и системы регулирования производительности турбопитательных насосов, а также выработки рекомендаций по их настройке.

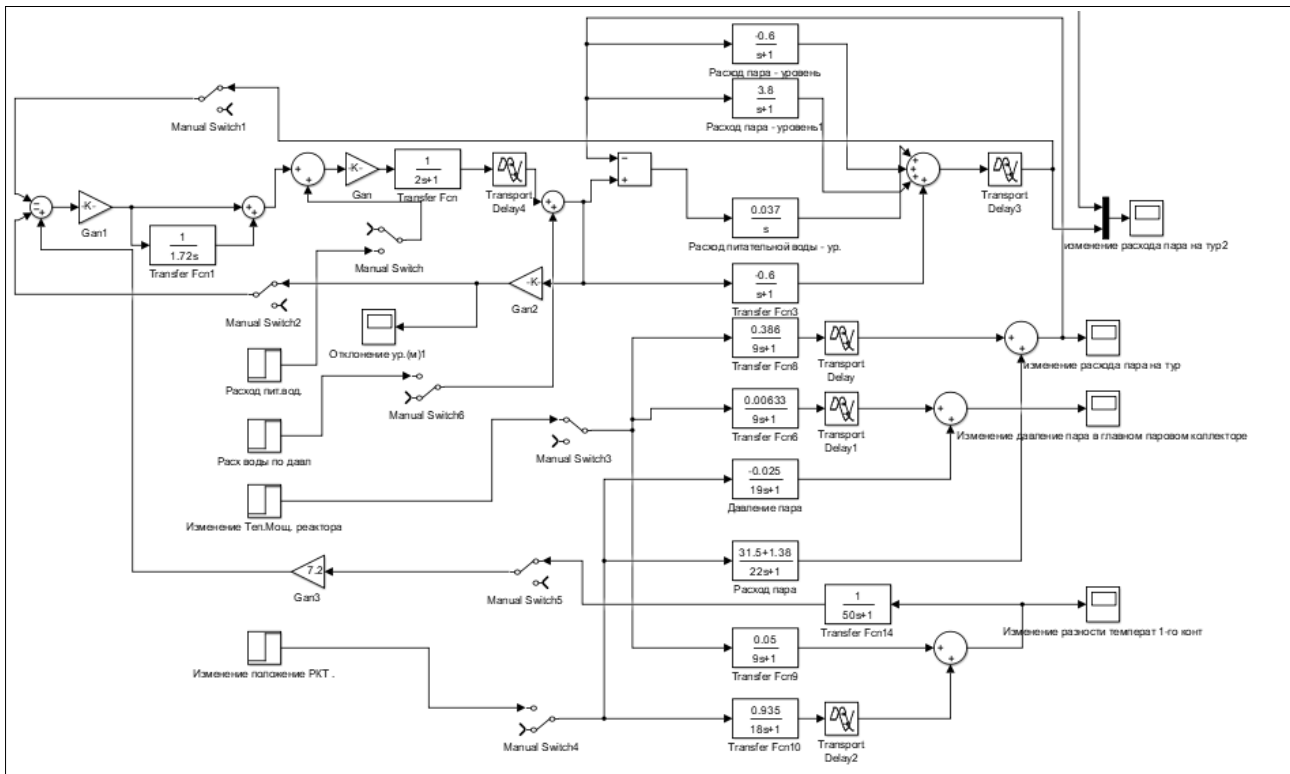


Рис. 10. Модель спроектированной АСР

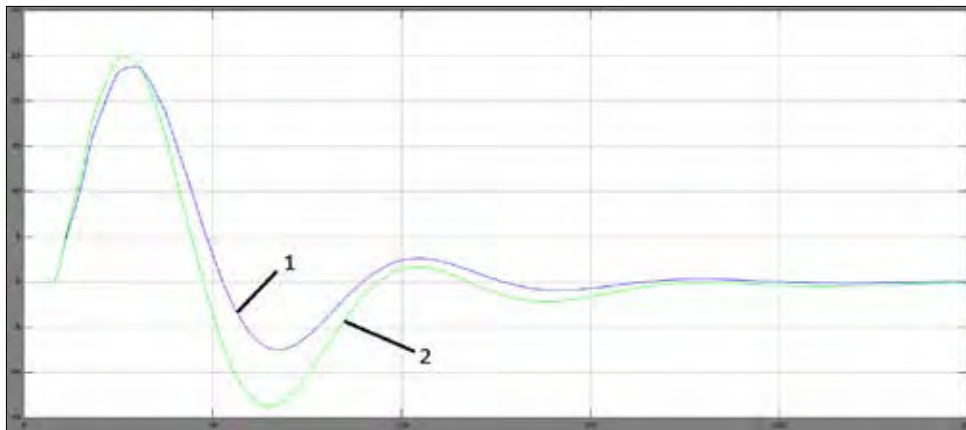


Рис. 11. Разница в регулировании с классической трёхимпульсной АСР (1)

Список литературы:

1. Демченко В.А. Автоматизация и моделирование технологических процессов АЭС и ТЭС. Одесса «Астропринт», 2001. 50 с.
2. Демченко В.А. Разработка математической модели динамики парогенератора ПГВ-1000 АЭС. Черкаси, 1997. Т. 1. С. 20–69.
3. Тошинський В.І., Бабіченко А.К., Молчанов В.І. Технічні засоби автоматизації. Частина 2. Мікропроцесорні регулювальні та виконавчі пристрої: навчальний посібник / за ред. А.К. Бабіченка. Київ, 1977. С. 200.
4. Демченко В.А., Стопакевич А.А., Ложечников В.Ф. Оптимальный ПИ-регулятор уровня воды в парогенераторе энергоблока АЭС с реактором ВВЭР-1000. Труды Одесского политехнического университета. № 1. 2000. С. 1–3.

ВДОСКОНАЛЕНА СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ РІВНЯ ВОДИ З СИГНАЛОМ ПО РІЗНИЦІ ТЕМПЕРАТУР В УСТАНОВЦІ ГЕНЕРУВАННЯ ПАРИ ЕНЕРГОБЛОКА ВВЕР-1000 АЕС

Генерування насиченої пари в енергоблоках АЕС з ВВЕР здійснюється в парогенераторах (чотири парогенератори на енергоблок). Найважливішим регульованим параметром у ПГ АЕС, як і для котлів ТЕС, є рівень води, від точності підтримки якого залежить якість пари і надійність. Удосконалення автоматизованих систем управління технологічними процесами барабанних котлів середньої потужності і енергоблоків АЕС є найважливішим засобом підвищення їх ефективності і надійності і однією з необхідних умов підвищення якості та зниження собівартості кінцевого продукту, підвищення його конкурентоспроможності як на внутрішньому, так і на зовнішньому ринках, сприяє економічному зростанню і технічному престижу України.

Ключові слова: автоматична система регулювання, трьохімпульсна система регулювання, автоматизація, математична модель, парогенератор.

UPGRADED SYSTEM OF AUTOMATION CONTROL OF THE WATER LEVEL WITH SIGNAL OF THE TEMPERATURE DIFFERENCE IN THE INSTALLATION OF STEAM GENERATION AT POWER UNIT IN VVER-1000 OF NPP

The generation of saturated steam in power units of NPPs with VVER is carried out in steam generators (four steam generators per power unit). The most important regulated parameter in NGPs of NPPs, as well as for TPP boilers, is the water level, the accuracy of which depends on the quality of steam and reliability. Improvement of automated process control systems for drum boilers of average power and NPP power units is the most important means of increasing their efficiency and reliability, and one of the necessary conditions for improving the quality and reducing the cost of the final product, increasing its competitiveness both in the domestic and international markets, economic growth and technical prestige of Ukraine.

Key words: automation control system, three-pulse control system, automation, mathematical model, steam generator.

УДК 62-503.56

Жученко О.А.Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Хібеба М.Г.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

МОДЕЛЬ ФОРМУВАННЯ ВУГЛЕЦЕВИХ ВИРОБІВ У РЕЖИМАХ ПІДГОТОВКИ ТА ПРЕСУВАННЯ

На основі аналізу наявних методів спрощення математичних моделей об'єктів з розподіленими параметрами обґрунтовано вибір методу Фур'є для спрощення математичної моделі процесу формування вуглецевих виробів. Розроблено спрощені математичні моделі для двох режимів роботи – підготовки та пресування. Визначено оптимальні структури спрощених математичних моделей. Проведено їх параметричну ідентифікацію. Досліджена відповідність результатів розрахунків за спрощеною та початковою математичними моделями.

Ключові слова: виробництво вуглецевих виробів, процес формування, математична модель, метод Фур'є, структурна та параметрична ідентифікація.

Постановка проблеми. Нині складно уявити собі сучасну промисловість без виробництва вуглецевих виробів, адже продукція цього виробництва застосовується в різних галузях промисловості: чорній та кольоровій металургії, машинобудуванні, хімічній промисловості та інших.

Значна ресурсо- та енергозатратність такого виробництва спричиняє потребу у використанні нових технологій та систем керування ними на всіх ключових етапах виробництва з метою зменшення затрат та забезпечення високої якості продукції. Одним з визначальних технологічних процесів виробництва вуглецевої продукції є процес формування вуглецевих виробів, під час якого формуються властивості вуглецевої сировини, що впливають як на перебіг наступних технологічних процесів виробництва, так і врешті-решт, на якість готової продукції [1; 2].

Синтез системи керування процесом формування вуглецевих виробів, яка забезпечувала б оптимальні режими його функціонування, неможливий без попереднього дослідження самого процесу. Дослідження на реальних об'єктах в умовах діючого виробництва досить затратне та може призвести до виходу з ладу технологічного обладнання, що фактично робить неможливим проведення промислового експерименту. Єдиною альтернативою в такій ситуації виступає метод математичного моделювання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Математичному моделюванню процесу пресування

присвячена значна кількість наукових праць [3–8]. З огляду на те, що процес пресування як об'єкт математичного моделювання є об'єктом з розподіленими параметрами, то у цих роботах, як правило, математична модель являє собою систему нелінійних нестационарних рівнянь у частинних похідних.

Час розрахунку такої моделі на сучасному стаціонарному комп'ютері складає декілька годин. Така тривалість розрахунку, по-перше, суттєво ускладнює безпосередньо дослідження процесу формування вуглецевих виробів і, по-друге, робить неможливим використання такої моделі у системах керування реального часу. Названі обставини висувають нагальну потребу спрощення початкової складної моделі.

Натепер є значна кількість підходів до спрощення моделей, з яких найчастіше використовується метод лінеаризації нелінійних диференціальних рівнянь, методи ідентифікації, метод Фур'є.

Метод лінеаризації передбачає зведення нелінійних диференціальних рівнянь до їх лінійного наближення [9]. Розв'язання системи лінійних диференціальних рівнянь – задача простіша, ніж розв'язання системи нелінійних диференціальних рівнянь, і розрахунок моделі, представленої у такому вигляді, займає набагато менше часу. Недоліками цього методу є те, що далеко не всі нелінійні диференціальні рівняння піддаються лінеаризації, а процеси, що мають явно виражений нелінійний характер можуть не досить точно описуватись такими моделями.

Методи ідентифікації дають змогу за отриманими зі складної моделі даними розрахувати коефіцієнти спрощеної моделі. Складнощі у застосуванні таких методів полягають у необхідності підбирати структуру моделі. Недолік таких методів полягає у тому, що навіть за підбраної оптимальної структури моделі зі збільшенням числа вихідних сигналів точність моделі значно зменшується [10].

Метод Фур'є передбачає представлення вихідних сигналів у вигляді ряду, що складається з суми добутків коефіцієнтів, які відображають зміну вихідних сигналів у часі, та коефіцієнтів, що відображають розподілення вихідних сигналів у просторі [11]. У таких моделях залежність вихідних сигналів від вхідних визначається ідентифікацією залежності значень коефіцієнтів, що відображають зміну вихідних сигналів у часі, від вхідних сигналів.

Постановка завдання дослідження. У роботі гідравлічного пресу для формування вуглецевих виробів можна виділити режим підготовки, який включає завантаження та підпресування електродної маси та безпосередньо режим пресування заготовок. Динаміка температур у цих режимах різна, тому потрібно розробляти спрощені моделі окремо для кожного з режимів.

Наведений вище короткий аналіз наявних методів спрощення математичних моделей об'єктів з розподіленими параметрами свідчить про те, що моделі, отримані за методом Фур'є, не мають недоліків моделей, створених за допомогою методів ідентифікації, адже кількість членів ряду, що потрібні для точного відображення вихідних сигналів (а отже, і кількість коефіцієнтів, що відображають зміну вихідних сигналів у часі), менша за кількість вихідних сигналів.

У зв'язку з цим як метод спрощення початкової складної математичної моделі процесу формування вуглецевих виробів доцільно вибрати метод розділення змінних Фур'є.

Таким чином, завданням цього дослідження є на основі методу Фур'є створити спрощену математичну модель процесу формування вуглецевих виробів для режимів підготовки та безпосередньо пресування, яка потребує короткого часу розрахунку та досить точно відтворює результати розрахунків за початковою складною моделлю.

Для того щоб реалізувати метод Фур'є необхідно отримати температурні «знімки», тобто температурні поля об'єкта за випадкових вхідних сигналів. Для отримання таких полів була використана початкова модель [3].

Апроксимація температурних знімків. Алгоритм формування спрощеної моделі включає такі кроки [11]:

- за отриманими раніше температурними знімками T_{snap} визначити матрицю $R' = T_{snap}^T T_{snap}$
- визначити власні значення $\Lambda_{R'}$ та власні вектори Ψ матриці R'
- обчислити значення базисних векторів $\phi_i = T_{snap} \Psi_i (\lambda_i)^{-1/2}$
- після визначення базисних векторів обчислити коефіцієнти Фур'є за формулою:

$$A_{snap} = [\tilde{a}_n(1) \quad \tilde{a}_n(2) \quad \dots \quad \tilde{a}_n(K)] = \Phi_K^T T_{snap}; \quad (1)$$

- обрати структуру моделі залежності між вхідним сигналом $u(t)$ та коефіцієнтами Фур'є $\tilde{a}_n(t)$ а на основі даних $\tilde{y}_n(t)$ і $\tilde{a}_n(t)$ ровести параметричну ідентифікацію;

– отримавши модель залежності $a_n(t)$ від $u(t)$ змодельовати зміну у часі коефіцієнтів Фур'є за будь-якої потрібної траєкторії вхідного сигналу;

- за формулою $T(t) = \Phi a(k)$ знаходимо зміну температурного поля у часі для заданої траєкторії вхідного сигналу.

Цей алгоритм необхідно реалізувати для різної кількості коефіцієнтів Фур'є n . У результаті має бути отримано серію моделей для різних n , серед яких потрібно визначити таку, що найкраще відображає температурні поля об'єкта.

Матриці температурних знімків для створення спрощених моделей формування вуглецевих виробів було взято з досліджень, оснований на початковій моделі [3]. У результаті розкладу за сингулярними числами були отримані значення базис-векторів ϕ_i . Далі за допомогою формули (1) визначені значення коефіцієнтів Фур'є. Результати розрахунків не наведені, тому що L (кількість точок (вузлів), в яких моделюється температура) становить сотні тисяч, а кількість кроків по часу K – сотні. З огляду на те, що Φ – має розмірність $L \times K$ а A – $K \times K$ повне виведення цих матриць є неможливим.

Для оцінки якості апроксимації було обрано похибку (2) для випадків використання $n=1..20$ перших базис-векторів.

$$\varepsilon_A = \frac{\sum_{\xi=1}^L \sum_{t=0}^K (T_{snap}(\xi, t) - T_A(\xi, t))^2}{KL} \quad (2)$$

де $T_A = \Phi_n A_n$ матриця $L \times K$ проксимованих температур, Φ_n, A_n перші n базис-векторів та коефіцієнтів Фур'є відповідно. Для заданої максимально допустимої похибки $\varepsilon_{max} = 0,01T_A$ використання у подальших дослідженнях більш ніж 11 базис-векторів для режиму підготовки та 16 базис-векторів для режиму пресування виявилось

недоцільним, оскільки така кількість уже забезпечила умову $\varepsilon_A < \varepsilon_{\max}$ (рис.1, 2). Приймаємо $n_{\max_підг} = 11$ та $n_{\max_прес} = 16$.

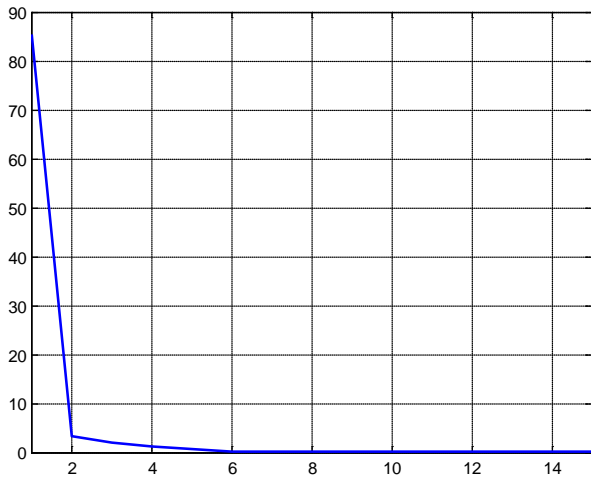


Рис. 1. Залежність похибки апроксимації від кількості членів ряду (підготовка)

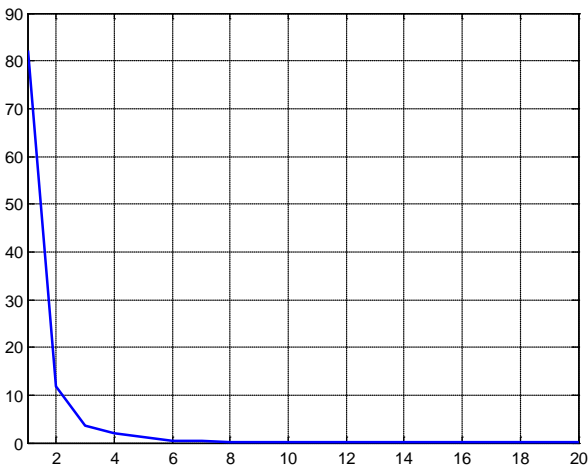


Рис. 2. Залежність похибки апроксимації від кількості членів ряду

Ідентифікація залежностей між отриманими значеннями коефіцієнтів Фур'є та вхідними сигналами. Для ідентифікації залежностей було використано пакет *System Identification Toolbox*, що входить до складу *Matlab* [12].

Задля автоматизації процесу пошуку оптимальної структури моделі було розроблено функції, що використовують функції з пакета *System Identification Toolbox*. У результаті ідентифікації для кожного з $n=1..n_{\max}$ було знайдено такі моделі, що найточніше описують зв'язок між значеннями коефіцієнтів $\alpha_i(t)$ та вхідними сигналами моделі $u(t)$. У всіх випадках найкраще з поставленою задачею впоралися ARX-моделі авторегресії зі структурою типу:

$$y(t) + a_1 y(t-1) + \dots + a_{n_a} y(t-n_a) = b_1 u(t-n_k) + \dots + b_{n_b} u(t-n_b-n_k+1) + e(t)$$

У таблицях 1, 2 містяться дані про конфігурацію оптимальних ідентифікаційних моделей режимів підготовки та пресування відповідно для кожного з n та їх точність [12].

Таблиця 1

Дані про оптимальні структури ідентифікаційних моделей режиму підготовки

n	na	nb	nk	Точність моделі, %
1	1	4	1	97,30
2	1	4	1	96,57
3	1	4	1	95,7
4	1	4	1	94,82
5	1	1	1	92,49
6	1	1	1	92,18
7	1	1	1	91,89
8	1	1	1	90,63
9	1	1	1	88,65
10	1	1	1	87,29
11	1	1	1	64,59

Таблиця 2

Дані про оптимальні структури ідентифікаційних моделей режиму пресування

n	na	nb	nk	Точність моделі, %
1	1	4	1	78,56
2	1	4	1	83,03
3	1	4	1	92,12
4	1	2	1	92,31
5	1	1	1	89,29
6	1	1	1	83,52
7	1	1	1	74,76
8	1	1	1	80,65
9	1	1	1	78,37
10	1	1	1	78,18
11	1	1	1	74,87
12	1	1	1	60,11
13	1	1	1	36,75
14	1	1	1	40,38
15	1	1	1	27,03
16	1	1	1	53,87

У цьому дослідженні є тенденція до зменшення точності моделей зі збільшенням n , адже збільшується кількість виходів моделі, характер зв'язків між входами і виходами стає складнішим. Для деяких моделей така залежність точності від n не справджується. Наприклад, для $n = 1..4$ точність моделей навпаки збільшується (табл. 2).

Дослідження якості роботи спрощених моделей. Для отримання спрощених моделей матрицю, що складається з n базис-векторів необхідно помножити на вектори вихідних сигналів ідентифікаційних моделей (значення коефіцієнтів $\alpha_i(t)$ у момент часу t). Оскільки в результаті моделювання отримано динаміку температури в усьому об'ємі мундштука та електродної маси, то для графічного представлення результатів доцільно зображати температури лише в деяких контрольних точках. Для графічного відображення результатів було обрано точки T_{11} , T_{21} , T_{31} , їх розташування показано на рис. 3.

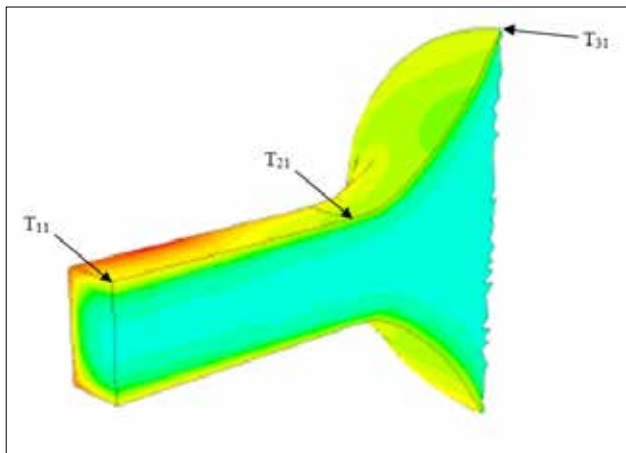


Рис. 3. Розташування контрольних точок

Результати роботи спрощених моделей режиму підготовки представлені на рис. 4–6.

Похибки роботи отриманих моделей обраховувались за допомогою формули (2), в якій T_A амінено на T_M матрицю змодельованих спрощеними моделями температур.

Модель з $n=1$ очікувано показала найгірші результати, відтворивши температури в середньому з похибкою у 9°C , що спричинено низькою якістю апроксимації температурних знімків лише одним базис-вектором (рис. 1.). Далі точність значно зростає для моделей з n від 2 до 6 (табл. 3, рис. 4–6), після чого зі збільшенням n похибка відтворення температурних знімків зменшується значно повільніше. Така динаміка зміни похибки пояснюється виконанням умови:

$$\|a_1\|_2^2 \geq \|a_2\|_2^2 \geq \dots \geq \|a_N\|_2^2. \quad (3)$$

У разі порівняння роботи моделей з $n=10$ та $n=11$ виявлено, що, незважаючи на більшу кількість базис-векторів, якими апроксимуються температурні знімки, похибка для $n=11$ більша за похибку для $n=10$. Попри високу точність апроксимації для $n=11$ ідентифікаційна модель з одинадцятьма виходами має досить низьку точність (табл. 1), що й спричиняє збільшення похибки роботи спрощеної моделі. З огляду на те, що кожен наступний член ряду вносить все менше «енергії» та те, що збільшення кількості виходів в ідентифікаційній моделі спричиняє зменшення її точності, слід очікувати, що подальше збільшення n призведе до значного збільшення похибки спрощеної моделі, що ще раз доводить доцільність вибору $n_{max}=11$.

Таблиця 3

Похибки відтворення температурних знімків режиму підготовки

n	1	2	3	4	5	6
Похибка	85,516	3,559	1,941	1,195	0,671	0,262
n	7	8	9	10	11	
Похибка	0,1414	0,1146	0,0927	0,0833	0,0859	

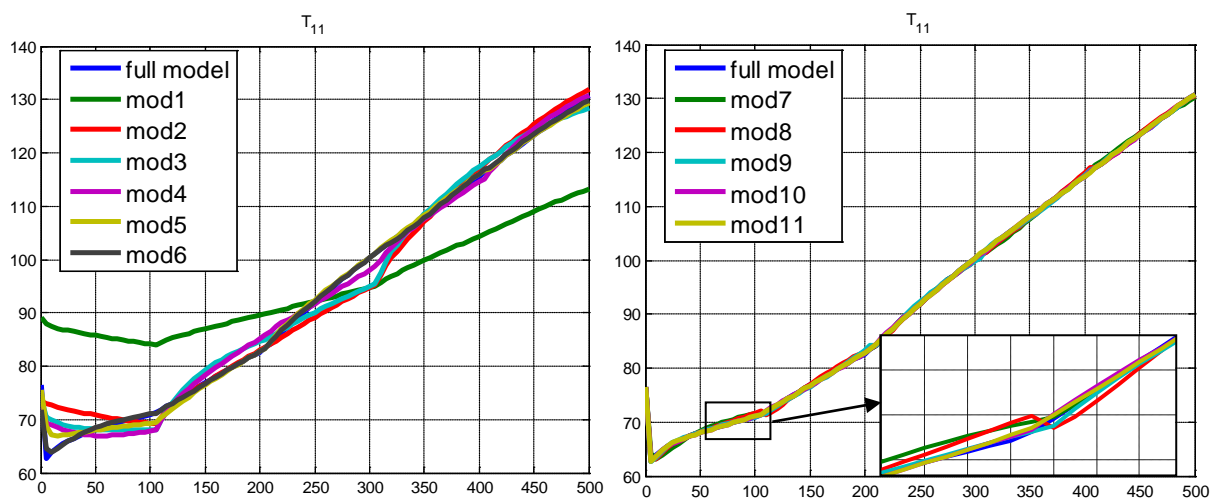


Рис. 4. Значення T_{11} отримані з повної моделі та спрощених моделей (full model – повна модель, mod1...11 – модель, що використовує 1...11 коефіцієнтів Фур'є)

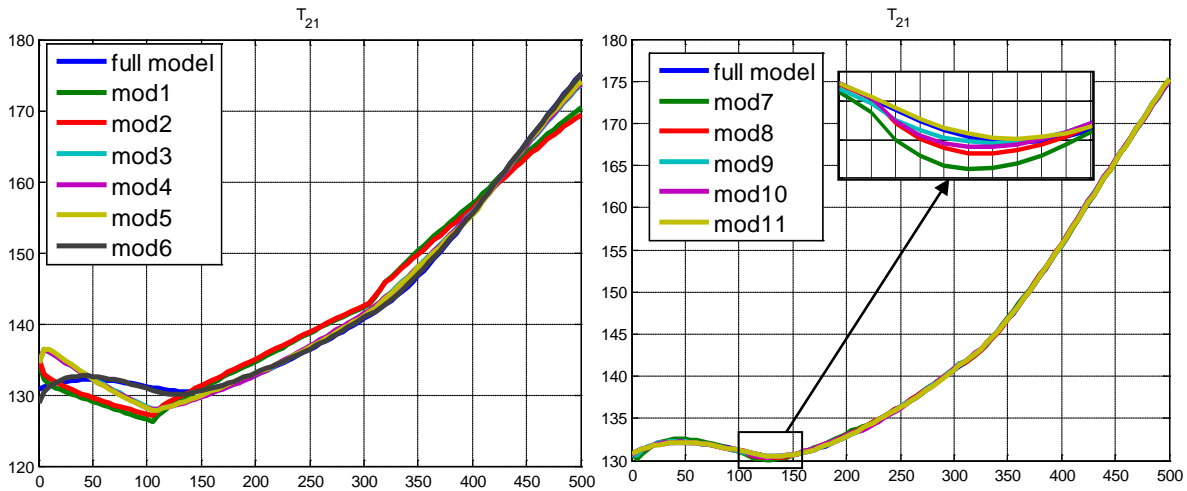


Рис. 5. Значення T_{21} отримані з повної моделі та спрощених моделей (full model – повна модель, mod1...11 – модель, що використовує 1...11 коефіцієнтів Фур'є)

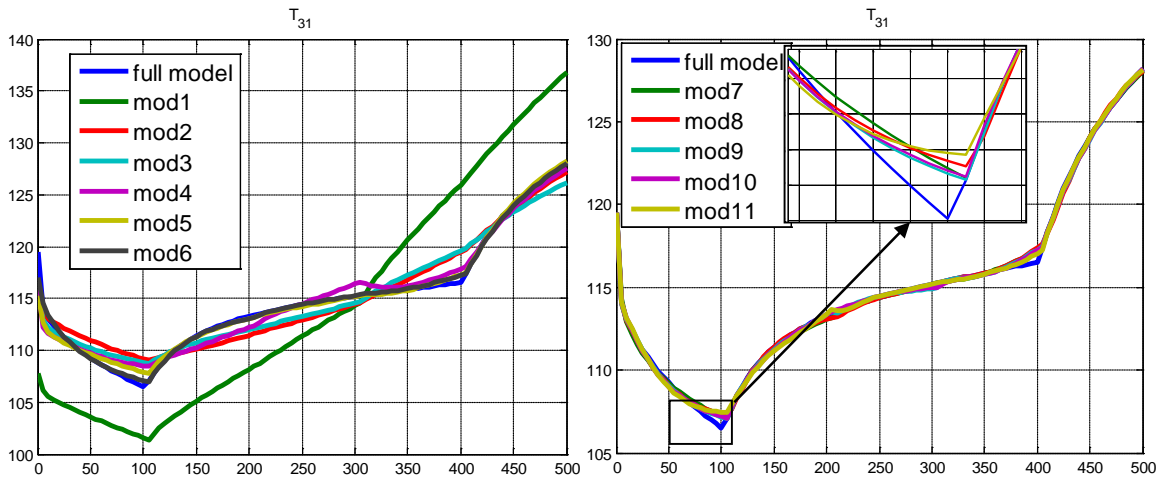


Рис. 6. Значення T_{31} отримані з повної моделі та спрощених моделей (full model – повна модель, mod1...11 – модель, що використовує 1...11 коефіцієнтів Фур'є)

Отже, в результаті дослідження якості роботи спрощених моделей у режимі підготовки було виявлено, що найбільш точною є спрощена модель, що використовує десять перших базис-векторів ($n=10$).

Далі було проведено аналогічне дослідження моделей для режиму пресування.

Модель з $n=1$, як і у попередньому дослідженні, показала найгірші результати, відтворивши температури в середньому з похибкою в $9,4^{\circ}\text{C}$, що спричинено низькою якістю апроксимації температурних знімків лише одним базис-вектором (рис. 7).

Далі точність зростає для моделей з n від 2 до 10 (табл. 4, рис. 7–9). Така динаміка зміни похибки

пояснюється виконанням умови (3). Винятком є модель з $n=7$, її похибка відтворення температурних знімків більша, ніж похибка моделі з $n=6$, що спричинено значно меншою точністю ідентифікаційної моделі з $n=7$ (табл. 2).

Моделі з $n=11...16$ мають похибки відтворення температурних знімків, що практично не залежать від кількості базис-векторів, якими апроксимуються температурні знімки. Це пояснюється тим, що збільшення кількості базис-векторів, починаючи з 11, призводить до такого малого збільшення точності апроксимації (рис. 7–9), що є несуттєвим порівняно з настільки значним зменшенням точності ідентифікаційних моделей (табл. 4).

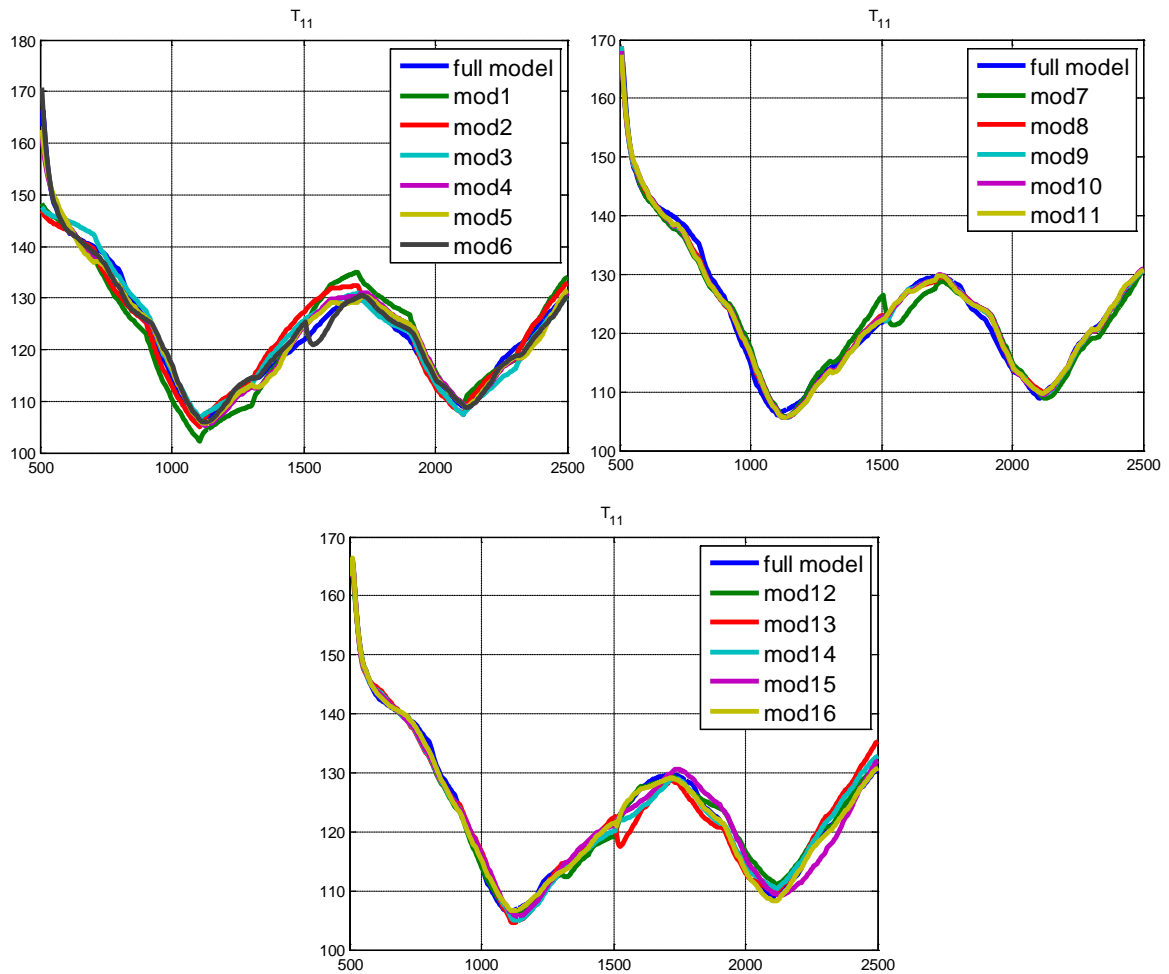


Рис. 7. Значення T_{11} , отримані зі складної моделі та спрощених моделей (full model – повна модель, mod1...16 – модель, що використовує 1...16 коефіцієнтів Фур'є)

Таблиця 4
Похибки відтворення температурних знімків у режимі пресування

n	1	2	3	4	5	6
Похибка	87,578	12,432	4,562	2,494	1,801	1,376
n	7	8	9	10	11	12
Похибка	1,877	0,749	0,730	0,676	0,6805	1,0786
n	13	14	15	16		
Похибка	2,134	1,504	4,409	0,6075		

Отже, в результаті дослідження якості роботи спрощених моделей було виявлено, що найбільш точними є спрощені моделі, що використовують десять та шістнадцять перших базис-векторів (табл. 4). Для подальших досліджень доцільно використовувати модель з $n=10$, оскільки збільшення кількості базис-векторів, а отже, й ускладнення ідентифікаційної моделі, призведе до несуттєвого збільшення точності моделі.

Висновки. Створення сучасної системи керування одним з основних технологічних процесів

у виробництві вуглецевих виробів – процесом їх формування – пов'язане із використанням математичної моделі процесу як на етапі попередніх досліджень, так і безпосередньо у системі керування реального часу.

Проведений аналіз наявних математичних моделей свідчить про неефективність останніх на етапі попередніх досліджень та неможливість їх використання у системах керування реального часу. Ці обставини спричинили потребу у розробленні спрощеної математичної моделі процесу формування.

Виконане дослідження відомих методів спрощення математичних моделей об'єктів з розподіленими параметрами дало можливість обґрунтовано вибрати метод розділення змінних Фур'є для спрощення початкової складної математичної моделі процесу формування.

Розроблені спрощені математичні моделі для двох режимів роботи гідравлічного пресу – підготовки та безпосередньо пресування. Визначені

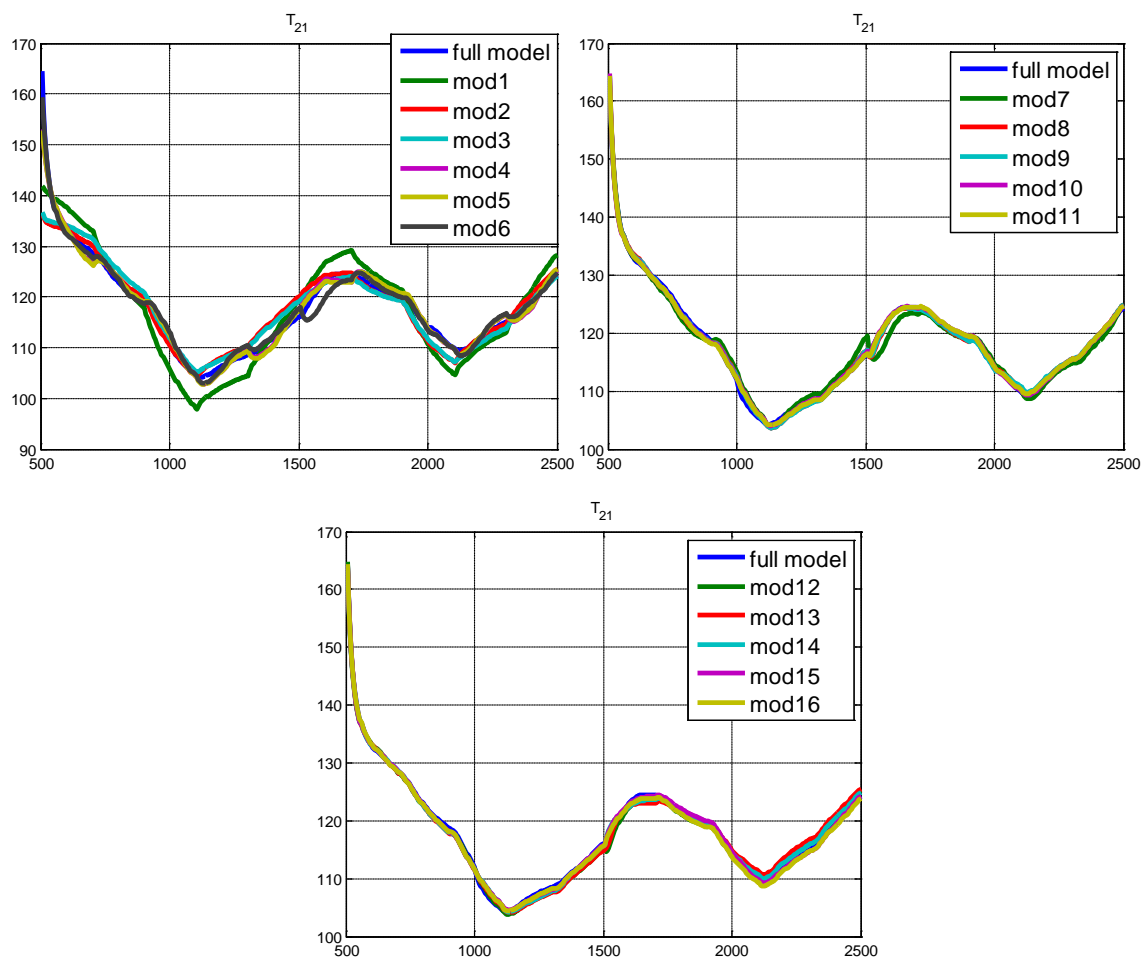


Рис. 8. Значення T_{21} , отримані зі складної моделі та спрощених моделей (full model – повна модель, mod1...16 – модель, що використовує 1...16 коефіцієнтів Фур'є)

оптимальні структури моделей та проведена їх параметрична ідентифікація.

Проведене дослідження відповідності результатів розрахунків за спрощеною математичною моделлю результатам, отриманим з початкової складної моделі, продемонструвало

високу ефективність запропонованих спрощених моделей.

У подальших дослідженнях розроблені спрощені математичні моделі можуть бути використані для синтезу системи керування процесом формування вуглецевих виробів.

Список літератури:

1. Чалых А.Ф., Соседов В.П. Графитация углеродистых материалов. М.: Metallurgy, 1987. 176 с.
2. Санников А.К., Сомов А.Б., Ключников В.В. Производство электродной продукции. М.: Metallurgy, 1985. 129 с.
3. Лазарев Т.В., Карвацкий А.Я., Лелека С.В., Педченко А.Ю. Математическая модель процесса экструзии вязко-пластичной углеродной массы. Вестник НТУ «ХПИ». Серия «Новые решения в современных технологиях». 2016. № 12 (1184). С. 31–37.
4. Рауендаль К. Экструзия полимеров. С-Пб.: Профессия, 2006. 768 с.
5. Торнер Р.В. Теоретические основы переработки полимеров. М.: Химия, 1977. 464 с.
6. Tadmor Z. Principles of Polymer Processing. N.-Y.: Wiley-Interscience, 2006. 961 p.
7. Галыгин В.Е., Баронин Г.С., Таров В.П., Завражин Д.О. Современные технологии получения и переработки полимерных и композиционных материалов: учебное пособие. Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. 180 с.
8. Василенко В.Н., Остриков А.Н., Рязских В.И. Математическая модель течения двух вязкопластичных сред в формирующем канале экструдера при коэкструзии. Вестник ВГУИТ. 2012. № 2. С. 64–67.
9. Юревич Е.И. Теория автоматического управления. БХВ-Петербург, 2016. 560 с.
10. Гончаров В.И., Нгуен Куанг Зунг, Тхан Вьет Зунг. Идентификация объектов управления с распределёнными параметрами. GISAP: Technical Sciences, Construction and Architecture. 2016. № 8. С. 8–11.

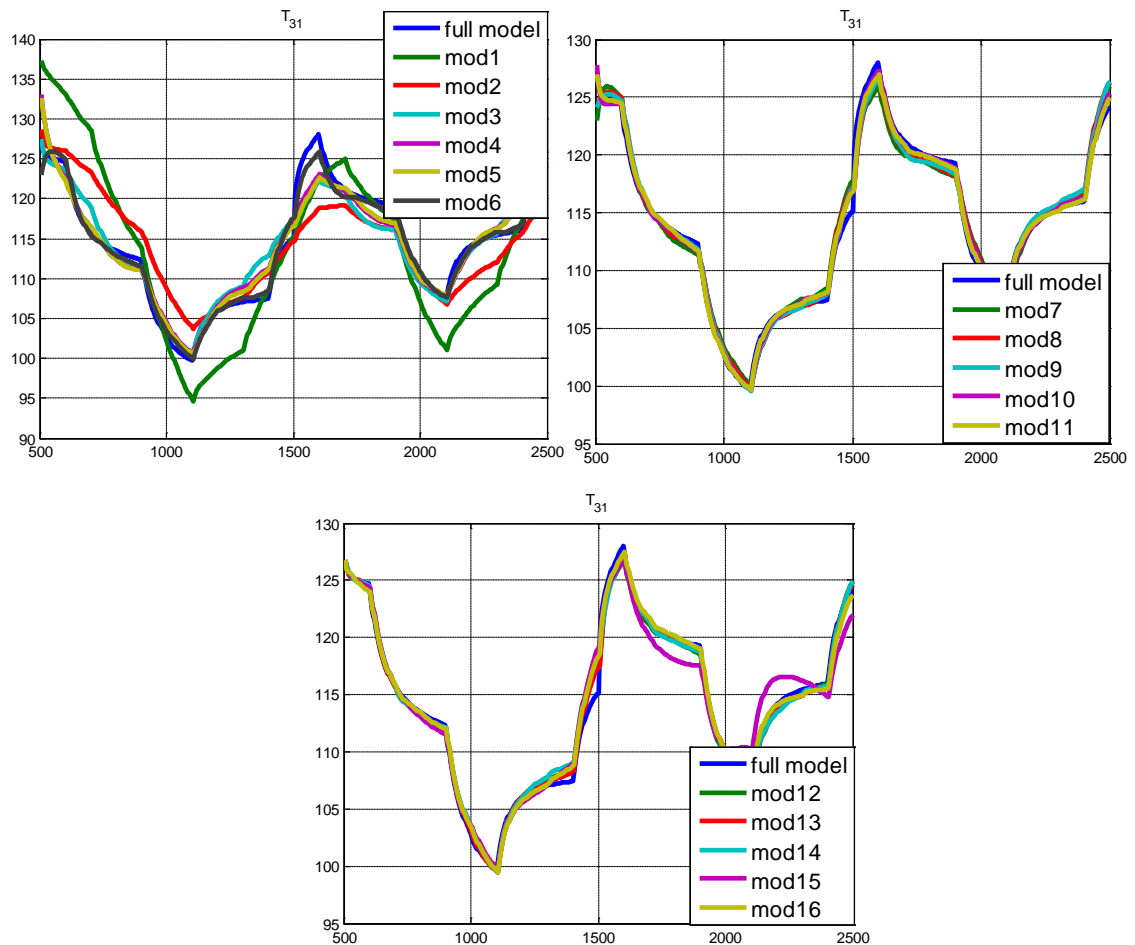


Рис. 9. Значення T_{31} , отримані зі складної моделі та спрощених моделей (full model – повна модель, mod1...16 – модель, що використовує 1...16 коефіцієнтів Фур'є)

11. Жученко О.А., Цапар В.С. Метод спрощення математичних моделей об'єктів керування із розподіленими параметрами. Автоматизація технологічних і бізнес-процесів. 2015. № 1. С. 15–25.

12. Дьяконов В.П. Matlab 6.5 SP1/7 + Simulink 5/6 в математике и моделировании. М.: СОЛОН-Пресс, 2005. 576 с.

МОДЕЛЬ ФОРМОВАНИЯ УГЛЕРОДНЫХ ИЗДЕЛИЙ В РЕЖИМАХ ПОДГОТОВКИ И ПРЕССОВАНИЯ

На основе анализа существующих методов упрощения математических моделей объектов с распределенными параметрами обоснован выбор метода Фурье для упрощения математической модели процесса формирования углеродных изделий. Разработаны упрощенные математические модели для двух режимов работы – подготовки и прессования. Определены оптимальные структуры упрощенных математических моделей. Проведена их параметрическая идентификация. Исследовано соответствие результатов расчётов по упрощённой и начальной математическим моделям.

Ключевые слова: производство углеродных изделий, процесс формирования, математическая модель, метод Фурье, структурная и параметрическая идентификация.

MODEL OF CARBON PRODUCTS FORMING IN PREPARATION AND PRESSING MODES

The choice of Fourier method to simplify carbon products forming process mathematical model was substantiated based on the existing simplifying mathematical models with distributed parameters methods analysis. Simplified mathematical models for two modes of operation – preparation and pressing were developed. The optimal structures of simplified mathematical models were determined. Their parametric identification was carried out. Correspondence of the calculation results using the simplified and initial mathematical models was investigated.

Key words: carbon products production, forming process, mathematical model, Fourier method, structural and parametric identification.

Кириленко М.В.

Одеський національний політехнічний університет

РОЗРАХУНОК ОПТИМАЛЬНИХ НАСТРОЮВАНЬ РЕГУЛЯТОРА РОЗРІДЖЕННЯ В ТОПКОВІЙ КАМЕРІ

У статті розглядається процес регулювання розрідження в топці котла. Складена структурна схема регулювання розрідження у верхній частині топкової камери з пристроєм вводу збурення. Визначені настроювальні параметри системи регулювання. Побудовано графік перехідної функції об'єкта управління. Проведено аналіз перехідних процесів.

Ключові слова: регулятор, розрідження, передатна функція, перехідні процеси, збурення, динамічне відхилення.

Постановка проблеми. Формування на території України ринкових відносин й інтеграція її в міжнародний економічний простір є основними причинами, що викликають необхідність розвитку енергозберігаючих й екологічно безпечних вітчизняних технологій. Сучасна технологія є однією з необхідних умов підвищення якості й зниження собівартості кінцевого продукту, а отже, і його конкурентоздатності як на внутрішньому, так і на зовнішньому ринках, і сприяє економічному росту й технічному престижу держави.

Підвищення технологічного рівня промисловості в галузі автоматизації може бути досягнуте за рахунок підвищення технічного рівня апаратних засобів, що реалізують типові закони й алгоритми керування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання оптимальних настроювань регулятора розрідження були розглянуті доц. О. Харабет у роботі «Вивчення класичної теорії автоматичного управління з допомогою сучасного персонального комп'ютера», П. Профос у праці «Регулювання паросилових установок», а також у роботі «Методичні вказівки й таблиці для вибору настроювань ПІ й ПІД регуляторів в одноконтурних системах регулювання теплових об'єктів із запізнюванням» за редакцією Л. Кін.

Постановка завдання. Упровадження системи автоматичного управління паровими і водогрійними котлами, побудованими на основі програмованих контролерів, дає змогу автоматизувати процес виробництва теплової енергії в котлах і значно спростити контроль і управління цим процесом. Використання цієї системи може значно підвищити ефективність функціонування котлоагрегату за рахунок зниження споживання енергоресурсів, раціонального спалювання палива, використання технологічного обладнання, опера-

тивного управління обладнанням і технологічним процесом. Крім того, впровадження таких систем дає змогу знизити вплив людського фактора у виробничому процесі та ймовірність виникнення аварійних режимів функціонування котла; підвищує екологічні характеристики котельні й культуру виробничого процесу.

Виклад основного матеріалу дослідження. Регулювання розрідження, звичайно, здійснюють за допомогою зміни кількості газів, що відходять та відсмоктуються димососами. При цьому їхню подачу можна регулювати: поворотними багатосильними дросельними заслінками; напрямними апаратами; гідромурфтами, змінюючи число обертів робочого колеса димососа або первинним двигуном, міняючи частоту обертання.

Найбільше поширення одержала схема регулювання розрідження з одноімпульсним ПІ-регулятором, що реалізує принцип регулювання по відхиленню.

Необхідне значення регульованої величини встановлюють за допомогою ручного задатчика ЗРП регулятора розрідження 1. За роботи котла в регулюючому режимі часто відбуваються зміни теплового навантаження й, отже, зміни витрати повітря. Робота регулятора повітря 2 приводить до тимчасового порушення матеріального балансу між вступником повітря і газами, що відходять. Для попередження цього порушення й збільшення швидкодії регулятора розрідження рекомендують увести на його вхід додатковий зникаючий вплив від регулятора повітря через пристрій динамічного зв'язку.

Регулятор розрідження одержує імпульси з розрідження в топці й додаткового зв'язку, що попереджає про зовнішнє збурення від регулятора повітря. Призначення цього зв'язку полягає у тому, щоб забезпечити зміну режиму роботи

димососа одночасно зі зміною режиму роботи дуттєвого вентилятора. Регулятор впливає на виконавчий механізм, що керує напрямним апаратом димососа.

Для підтримки величини розрідження на заданому рівні застосована комбінована система з компенсацією зовнішнього збурювання. Головним збурюючим впливом прийнята витрата загального повітря. Структурна схема такої системи регулювання представлена на рисунку 1.

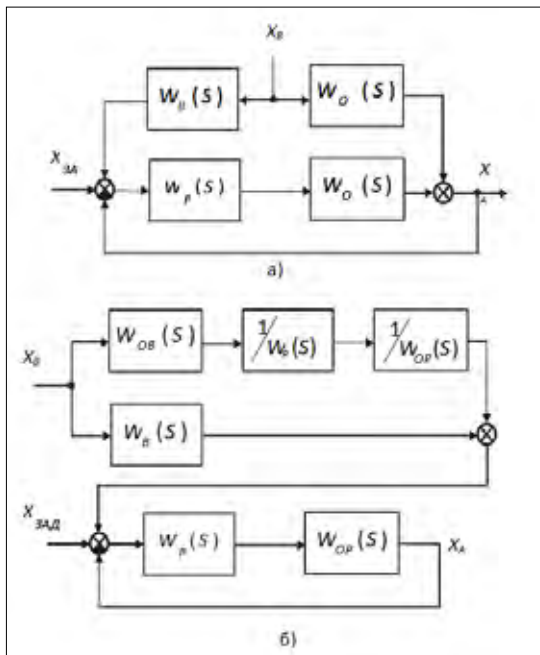


Рис. 1. Структурна схема АСР розрідження з пристроєм вводу збурення

Тут $W_{OM}(S)$ і $W_{OB}(S)$ – передатні функції регульованого об’єкта по каналах регулюючого й збурюючого впливів відповідно; $WB(S)$ – передатна функція пристрою уведення зовнішнього впливу, що збурює систему регулювання.

Використавши правила перетворення структурних схем і привівши збурювання X_B до входу регулятора, можна записати зображення регульованої величини системи:

$$\begin{aligned}
 X_A(S) = & \frac{W_{MM}(S)W_P(S)}{1 + W_{MM}(S)W_P(S)} X_A(S) + \\
 & + \left[\frac{W_{ME}(S)}{W_{MM}(S)W_P(S)} + W_B(S) \right] \\
 & \frac{W_{OM}(S)W_P(S)}{1 + W_{OM}(S)W_P(S)} X_B(S). \quad (1)
 \end{aligned}$$

Виразення в дужках у другому складі рівняння (1) є фільтром, через який проходять збурювання

перед входом у систему регулювання у вигляді регулюючого впливу.

Виразення (1) можна записати у вигляді:
 $X_A(S) = \Phi P(S) X_{ЗАД}(S) + W_{ФВ}(S) \Phi P(S) X_B(S),$ (2)
 де $\Phi P(S)$ – передатна функція замкнутої системи регулювання по каналу регулюючого впливу; $W_{ФВ}(S)$ – передатна функція фільтра.

Легко помітити, що характеристичне рівняння замкнутої системи регулювання

$$1 + WP(S)W_{OM}(S) = 0 \quad (3)$$

не залежить від властивостей фільтра (а значить, і пристрою уведення впливу, що збурює АСР), тому стійкість системи визначається тільки властивостями замкнутої АСР.

З виразення (2) треба, що за умови

$$W_{ФВ}(S) = 0 \quad (4)$$

відхилення регульованої величини у разі зміни зовнішнього впливу, що збурює АСР, і сталості регулюючого впливу буде дорівнювати нулю.

З виражень (1) і (4) ясно, що умова абсолютної інваріантності буде витримана, якщо передатна функція пристрою уведення збурюючого впливу буде дорівнювати:

$$WB(S) = - \frac{W_{OB}(S)}{W_{OM}(S)W_P(S)}. \quad (5)$$

Підставимо у виразення (5) передатні функції об’єкта по регулюючому й збурюючому каналах і передатну функцію ПІ-регулятора.

$$WB(S) = - \frac{K1}{\frac{T1S + 1}{K3} \cdot \frac{kp(TuS + 1)}{T3S + 1} \cdot TuS} \quad (6)$$

Оскільки $T1 = T3$, то після скорочення подібних додатків, одержуємо передатну функцію пристрою уведення збурюючого впливу

$$W(S) = \frac{K1 \cdot Tu}{K3 \cdot kp} \frac{S}{TuS + 1} = \frac{kdS}{TdS + 1} \quad (7)$$

Пристрій уведення є реальною диференціюючою ланкою.

Засобами апаратної реалізації типовий АСР у такому проекті є мікропроцесорний керуючий комплекс Simatic 300 фірми Siemens. Тому інформація про зміну контрольованих параметрів (вхідна інформація) може бути отримана в абсолютних одиницях і необхідність обліку коефіцієнтів передачі вимірювальних перетворювачів відпадає.

Тривалість включення виконавчого механізму є результатом цифрового розрахунку й реалізується програмним шляхом. Налаштовувальні пара-

Показники якості регулювання в АСР розрідження

Параметр	Відхилення регульованої величини, ΔX_a	Ступінь загасання перехідного процесу, $\psi = \frac{\Delta X_1 - \Delta X_3}{\Delta X_1}$	Час регулювання, T_r , з	Статична помилка
Розрідження ΔP_r , Па	55	0.95	30	0

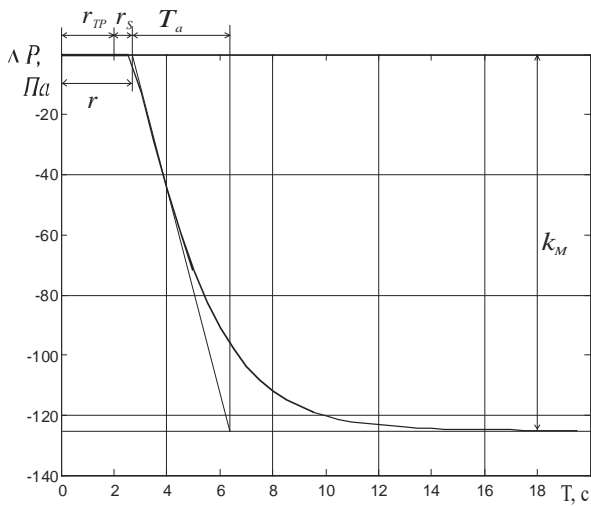


Рис. 2. Перехідна функція об'єкта управління

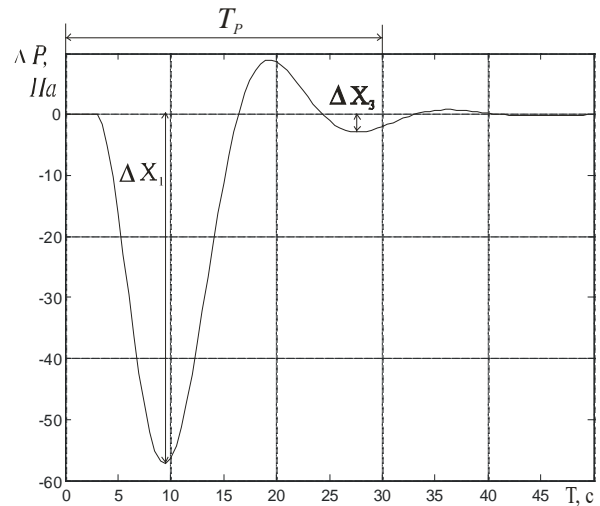


Рис. 3. Перехідний процес в АСР розрідження

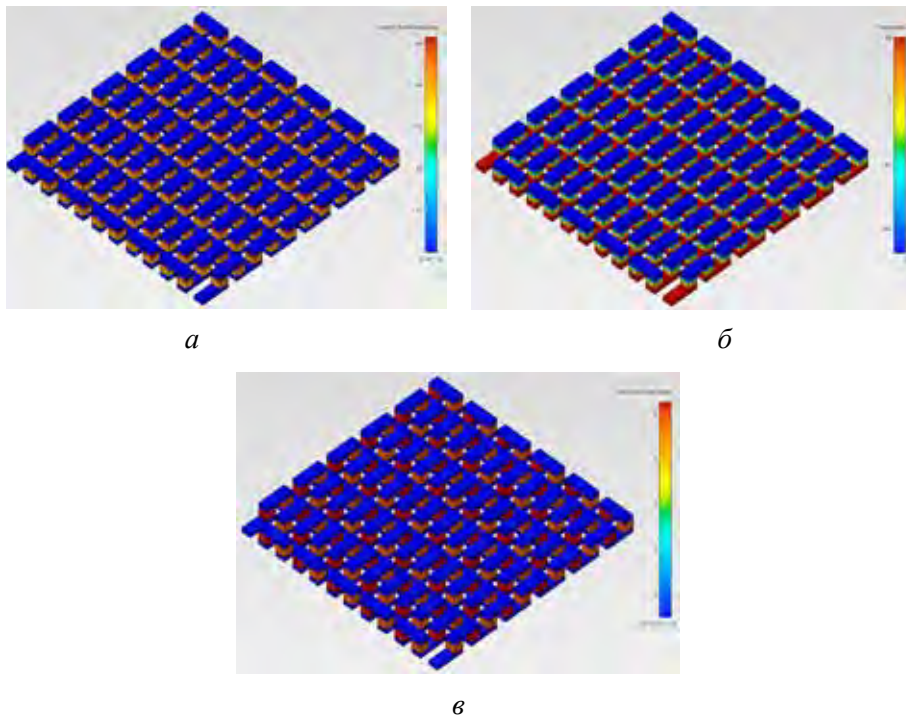


Рис. 4. Зміна положення направляючого апарата димососа

метри ПІ-регулятора розрідження визначаються за методикою Л. Кін шляхом обробки перехідної функції об'єкта керування по регулюючому каналі (рисунок 2).

Настроювання ПІ-регулятора розрідження:

1) Відношення $\tau/T=2.7/3.5=0.771$, звідки для ступеня загасання перехідного процесу $m=0.37$, $a=0.8$, $i=1.43$ знаходимо $k=0.62$, $c=0.95$.

2) Коефіцієнт передачі регулятора

$$k_p = \frac{k}{k_M} = \frac{0.62}{125} = 0.00496 \frac{\%}{\text{Па}};$$

3) Час ізодрома $T_u = c \cdot \tau = 0.95 \cdot 2.7 = 2.57$ с.

Настроювання пристрою зв'язку (реальна ланка, що диференціює):

$$4) kd = \frac{673}{125} \cdot \frac{2.57}{0.00496} = 2789 \frac{c \cdot \text{Па}}{\text{кг} / \text{с}}; T_d = 2.57 \text{ с.}$$

Основним збурюючим впливом для системи регулювання розрідження в топковій камері є зміна витрати повітря на пальникові пристрої.

Показники якості перехідних процесів представлені в таблиці 1. Величина введеного збурювання становить 10% від номінальної витрати повітря ($ML = 13.9$ кг/з, $\Delta ML = 1.39$ кг/с).

Під час регулювання розрідження в топці величина першого динамічного відхилення становить 55 Па (рисунок 3). Така величина є задовільною

й не призводить до спрацьовування захисту щодо порушення розрідження (150 Па) за різкої зміни навантаження на 10% від номінального значення. Максимальне динамічне відхилення положення напрямного апарата димососа за 10% збурювання становить 8.05%. Однак для його реалізації потрібен виконавчий механізм із великою швидкістю переміщення регулювального органа.

Висновки. За перехідним процесом видно, що регулювання розрідження у топці котла є складним та інерційним процесом. Порівняння показників якості перехідних процесів у одноконтурній та у комбінованій системах свідчить про беззаперечну перевагу комбінованої системи. Для визначення динамічних характеристик котла отримала подальший розвиток математична модель, заснована на вирішенні рівнянь збереження маси, енергії та об'єму. Було проведено лінеаризацію системи нелінійних рівнянь. Така модель дає змогу визначити кількісний склад умовної формули динаміки котла. У результаті проведеного аналізу впливу зовнішніх збурень визначено криві розгону збурюючими каналами для забезпечення якісної підтримки розрідження в топці. Розроблений математичний опис може бути використано для подальшого синтезу системи автоматичного регулювання.

Список літератури:

1. Профос П. Регулювання паросилових установок. Енергія, 1967.
2. Александров В.Г. Парові котли середньої й малої потужності. Енергія, 1972.
3. Рівкін С.Л., Александров А.А. Термодинамічні властивості води й водяної пари. М., «Енергія», 1975.
4. Методичні вказівки й таблиці для вибору настроювань ПІ й П регуляторів в одноконтурних системах регулювання теплових об'єктів із запізнюванням / Укл.: Л. Кін. Одеса: ОПІ, 1972.

РАСЧЕТ ОПТИМАЛЬНЫХ НАСТРОЕК РЕГУЛЯТОРА РАЗРЯЖЕНИЯ В ТОПОЧНОЙ КАМЕРЕ

В статье рассматривается процесс регулирования разряжения в топке котла. Составлена структурная схема регулирования разряжения в верхней части топочной камеры с устройством ввода возмущения. Определены параметры настройки системы управления. Построен график переходной функции объекта управления. Проведен анализ переходных процессов.

Ключевые слова: регулятор, разряжение, передаточная функция, переходные процессы, возмущение, динамическое отклонение.

CALCULATION OF OPTIMUM SETTINGS OF THE REGULATOR OF THE VACUUM IN A CHAMBER

The article discusses the process of regulating the pressure in the boiler furnace. The structural scheme of the regulation of the rarefaction in the upper part of the combustion chamber with the device of input of perturbation is made up. The tuning parameters of the control system are determined. A graph of the transitive function of the object of management is constructed. The analysis of transient processes is carried out.

Key words: regulator, pressure, transfer function, transients, perturbation, dynamic deviation.

УДК 004.021

Киричек Г.Г.

Запорізький національний технічний університет

Рудьковський О.Р.

Запорізький національний технічний університет

Тимошенко В.С.

Запорізький національний технічний університет

ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНА СИСТЕМА ПІДТРИМКИ ОБЧИСЛЕНЬ

У роботі проведено аналіз наявних децентралізованих систем, здатних підтримувати роботу сервісних додатків, наведено етапи реалізації системи з підтримки обчислень у децентралізованих мережах, а також етапи розробки протоколу передачі й обробки інформації для децентралізованих мереж різного призначення.

Ключові слова: децентралізація, обчислення, мережа, алгоритм, шифрування, ізольоване середовище.

Постановка проблеми. Розвиток комп'ютерної інженерії та інформаційних технологій досяг рівня, що дає змогу майже будь-який предмет підключити до мережі. Тому питання доступності інформації, підвищення швидкодії її отримання та використання, підвищення ефективності та якості проведення обчислень є дуже актуальними натеper. У сучасному світі складно уявити виконання багатьох задач без використання сервісів. З розвитком технологій все гостріше постають питання подальшого розвитку мереж та забезпечення їх безпеки. Вирішенням усіх вище зазначених проблем є децентралізація мереж та додатків.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останнім часом набули популярності різні децентралізовані додатки та мережі. Найбільш популярними є Manet, ZigBee, Ethereum, EOS. Manet та ZigBee є фізичними децентралізованими мережами, а Ethereum та EOS – оверлейні мережі з підтримкою роботи децентралізованих додатків [1; 2]. Оскільки більша частина децентралізованих мереж оверлейні, вони використовують уже наявні протоколи для передачі інформації, ними зазвичай є транспортні протоколи: Transmission Control Protocol (TCP) та User Datagram Protocol (UDP). Різні децентралізовані мережі використовують різні протоколи. Деякі підтримують роботу, використовуючи обидва протоколи. Майже всі мережі не використовують власні алгоритми шифрування та хешування, а використовують вже наявні методи, надійність яких доведена вченими [3–7]. Такий підхід підвищує надійність готового продукту та зменшує вірогідність помилки у разі розробки нових методів. Тому для реалізації

мереж використовують наявні бібліотеки, методи та функції. З вищезазначеного зрозуміло, що є багато технологій децентралізованих мереж та сервісних додатків різного призначення. Кожен з них використовує власні методи та алгоритми у реалізації специфічних завдань [1; 2]. Виходячи з вимог конкретної мережі або додатка, обираються алгоритми. Але майже всі рішення не здатні задовольнити потреби нових сервісів, що постійно реалізуються в мережі. Тому в цій роботі запропоновано вирішення цих проблем шляхом реалізації децентралізованої системи підтримки роботи сервісних додатків.

Наявні децентралізовані мережі, які підтримують роботу сервісних додатків, мають власні мови програмування. Найпопулярнішою є Solidity, яка є інтерпретованою, об'єктно орієнтованою, розроблена для криптовалюти Ethereum та підтримує функції, змінні, цикли та умовні оператори. До традиційних мов відносяться Java, C++, C#, Python та ін [8; 9]. Для кожної з них є безліч бібліотек та готових рішень. Їхня швидкість роботи вища, ніж у Solidity, вони мають додаткові утиліти для перевірки та оптимізації сирцевого коду. Крім цього, всі ці мови мають доступ до заліза і мережі, дають змогу створювати складні додатки. З огляду на це зрозуміло, що слід використовувати одну з традиційних мов – C++, Java, C# або Python.

Постановка завдання. Мета роботи – проведення досліджень та реалізація методу підтримки обчислень у децентралізованих мережах шляхом розробки протоколу децентралізованої мережі з підтримкою роботи сервісних додатків. Об'єктом дослідження є процес підтримки обчис-

лень у децентралізованих мережах. Предметом дослідження є моделі, методи та інструментальні засоби підтримки ефективної взаємодії кінцевих пристроїв у децентралізованому середовищі. Основним завданням роботи є проведення досліджень та на їх основі розробка моделей, методів та засобів підтримки ефективної взаємодії кінцевих пристроїв у децентралізованій мережі з можливістю передавати, зберігати, обробляти дані як із використанням сервісних додатків, так і без них. Під час розробки програмного забезпечення (ПЗ) необхідно вирішити такі задачі: реалізувати децентралізовану систему з підтримки роботи сервісів; провести тестування децентралізованої системи на працездатність. Система реалізується як протокол передачі та обробки інформації для децентралізованих мереж різного призначення. Для роботи з мережею користувач використовує стороннє ПЗ або розроблене власноруч на основі чіткого алгоритму роботи окремих частин мережі.

Виклад основного матеріалу. Одним з основних завдань є реалізація децентралізованої мережі, яка підтримує: децентралізований обмін даними; децентралізоване зберігання інформації та запуск сервісів у децентралізованій мережі. За результатами попереднього аналізу та проведених досліджень виявлена необхідність у децентралізованій мережі, яка здатна підтримувати роботу сервісних додатків. У результаті першого етапу її реалізації розроблено та наведено модель децентралізованої системи, загальними елементами якої є фізичні елементи мережі та логічні зв'язки між ними (рис. 1).



Рис. 1. Модель децентралізованої системи

Як видно на рисунку, в реальній системі є декілька типів вузлів: користувацький, сховище, середовище виконання та вузли, що поєднують одночасно декілька функцій. Окрім того, всі вузли системи є транзитними, тому будь-хто може підключитись до системи через ці вузли. Система у

кожен момент часу є централізованою, децентралізованою або розподіленою; інформація зберігається на всіх пристроях або на окремих, а додатки виконуються на будь-якому вузлі системи або на спеціальних вузлах. За великої кількості пристроїв система частіше всього є розподіленою, а під час роботи додатків вона є частково децентралізованою, тому що є вірогідність існування одного або декількох центральних елементів, які керують додатками. За наявності великої кількості пристроїв у мережах різних типів система є повністю розподіленою під час пересилання та зберігання даних.

Реалізований протокол описує оверлейну децентралізовану мережу, яка здатна передавати, зберігати та обробляти дані користувачів. Передача виконується децентралізовано без прямого встановлення зв'язку між клієнтами. Дані зберігаються розподілено та публічно. Обробка даних виконується за рахунок підтримки роботи сервісних додатків у рамках мережі. Протокол описує взаємодію модулів мережі. Кожен модуль відповідає за певні функції в рамках мережі. Такий підхід дає змогу швидко змінювати складові частини додатка, які реалізує клієнт мережі, не впливаючи на роботу інших модулів. Усього протокол описує дев'ять модулів: мережі; повідомлень; хешування; шифрування; команд; пам'яті; маршрутизації; серіалізації; додатків та розширень (рис. 2). Додаток, що реалізує протокол, може використовувати не всі модулі, а лише необхідні для його роботи. Кожен модуль виконує одну дію і це зменшує кількість помилок та допомагає тестувати окремі частини мережі. Далі детально розглянемо всі модулі.



Рис. 2. Взаємозв'язок модулів протоколу

Додатково протокол описує структуру пакетів у рамках мережі, алгоритми та формат адрес і

даних, що передаються. Додаткове ПЗ, необхідне для роботи мережі, обирається програмістом, який інтегрує мережу у свій додаток. Протокол описує взаємодію двох типів пристроїв у мережі: кінцеві та транзитні. Транзитним є будь-який вузол, що не є відправником або отримувачем повідомлення. Один фізичний пристрій може одночасно бути як транзитним вузлом, так і кінцевим, оскільки кожен додаток, що використовує мережу є незалежною одиницею та має власну адресу. Сервісні додатки та дані виконуються на транзитних вузлах. Транзитні вузли передають дані та не мають доступу до вмісту даних. Будь-який транзитний вузол може отримати будь-яку інформацію, що зберігається у мережі. Не всі рівні моделі використовуються під час роботи протоколу. Деякі додатки можуть обмежуватись певним необхідним рівнем, наприклад транзитні вузли можуть реалізовувати рівні до модуля повідомлень включно, оскільки інші рівні в їхньому разі не використовуються. Додатково кожен з модулів є незалежним і може використовуватись з будь-якого іншого модуля, наприклад модуль команд може шифрувати та дешифрувати дані напряму без звертання до модуля повідомлень. Дані у мережі передаються у текстовому вигляді. Перед передачею даних вони серіалізуються. Як алгоритм серіалізації обрано формат даних JSON, що широко використовується у сучасних додатках. Для передачі інформації використовуються пакети. Пакет має два рівні: транзитний та клієнтський. Транзитний рівень є відносно публічним і будь-хто може отримати до нього доступ. Клієнтський рівень призначений для отримувача пакета і передається у зашифрованому вигляді.

Модуль мережі реалізує метод, який відповідає за встановлення з'єднання між клієнтами. Він керує з'єднанням, передачею та отриманням інформації за допомогою протоколу TCP, а також буде певний абстрактний шар між децентралізованою мережею та наявною фізичною мережею. За допомогою цього методу створюється оверлейна мережа, яка працює з будь-яким фізичним з'єднанням та протоколом. Модуль мережі є найнижчим модулем. Він отримує дані, які необхідно надіслати, та передає їх необхідному вузлу і працює лише з вузлами, що підключені до нього.

Модуль команд призначено для створення додатків, які використовують мережу. Завдяки командам розширюються можливості мережі та додаються нові функції. Вони не є сервісами у мережі, а є їх заміною у певних випадках. Типо-

вим використанням команди є передача спеціалізованого повідомлення, запит на підключення, додавання або отримання даних. За допомогою команд підтримується працездатність мережі. Додаток може додати власні команди до наявних. У разі отримання команди додаток перевіряє, чи може він її виконати. Якщо виконати команду не можна, додаток її відкидає. Інакше вона виконується. Командою є спеціальний об'єкт. Дані команди зберігаються у цьому об'єкті. Команда є надбудовою над повідомленням та не відрізняється від повідомлення зовні. Вона відрізняється тим, що може виконувати будь-які дії, відсилати відповіді та реагувати на них. Інакше кажучи, метод дає змогу створювати двонаправлену взаємодію. Приклад методу наведено у лістингу 1. Метод отримує повідомлення та надсилає відповідь. Команда приймає рядок. Відповідь містить вхідний рядок великими літерами, поточну дату та час.

Лістинг 1 – Приклад реалізації:

```
import command
import simple_package
import simple_response_package
import datetime
class SimpleCommand(command.Command):
    def handle(self, package: simple_package.SimplePackage):
        response = simple_response_package.SimpleResponsePackage()
        response.date = datetime.datetime.now()
        response.message = package.message.capitalize()
        self.send_response(response).
```

Модуль повідомлень формує, передає та отримує нові повідомлення (пакети). Він працює з модулями мережі, шифрування, хешування та серіалізації. Цей модуль розбиває дані на сегменти, формує пакети та передає їх модулю мережі для передачі. Також він отримує дані від модуля мережі. Після отримання даних з мережі він десеріалізує їх та зчитує транзитний рівень. Якщо додаток є вузлом, якому відправлено дані, то він виконує необхідні дії для обробки пакета (рис. 3). Якщо вузол є транзитним, то він формує новий ланцюг та надсилає наступному вузлу. Якщо поточний вузол не є кінцевим або транзитним, то пакет видаляється.

Модуль шифрування виконує такі дії: шифрує дані; дешифрує дані; генерує спільний ключ. Він працює з такими алгоритмами шифрування: Elliptic Curve (ECC), Elliptic Curve Diffie-Hellman (ECDH) та AES [5–7,10].



Рис. 3. Алгоритм побудови ланцюга вузлів для передачі інформації

Модуль хешування виконує дві операції: хешує дані та перевіряє хеш. Модуль серіалізації (лістинг 2) перетворює структури даних на рядки у форматі JSON. Він десеріалізує дані з рядка в об'єкти мови програмування. Оскільки додаток розробляє будь-хто, він може містити нестандартні повідомлення та структури даних. Тому вирішено передавати дані без прив'язки до мов програмування, а додати ідентифікатори.

Лістинг 2 – Модуль серіалізації:

```
import sys, os
import json
from serialization import Encoder
sys.path.insert(0, os.path.dirname(os.getcwd()))
class Serializer(object):
```

```
__instance = None
staticmethod
def get_instance():
    if Serializer.__instance is None:
        Serializer.__instance =
Serializer()
    return Serializer.__instance
def __init__(self):
    self.types = {
        # messages types
    }
    self.encoder = Encoder.Encoder()
def serialize(self, obj):
    return json.dumps(obj, default=self.encoder)
def deserialize(self, message):
    return json.loads(message,
default=self.encoder)
def get_type(self, obj):
    return obj.__class__.__bases__[0].__name__
def add_type(self, obj, tag):
    obj_type = self.get_type(obj)
    self.types[obj_type] = tag.
```

Модуль розширень додає нові типи даних, що підлягають серіалізації та команди. Без цього клієнти можуть не знати, як правильно перетворити серіалізовану послідовність на об'єкти. Модуль розширень зв'язує додаткові ідентифікатори з типами даних, яким вони відповідають.

Лістинг 3 – Модуль розширень:

```
from serialization import Serializer
class Extensions(object):
    __instance = None
    @staticmethod
    def get_instance():
        if Extensions.__instance is None:
            Extensions.__instance =
Extensions()
    return Extensions.__instance
    def __init__(self):
        self.serializer = Serializer.
Serializer()
    def add_type(self, obj, tag):
        self.serializer.add_type(obj, tag).
```

Модуль пам'яті виконує роль розподіленої бази даних. Він відповідає за зберігання даних з мережі у вигляді розподіленої хеш-таблиці. Додаток може обмежувати обсяг даних, які він зберігає. Модуль маршрутизації – один з найважливіших у мережі. Саме він відповідає за побудову маршруту від відправника до отримувача. За основу маршрутизації в роботі обрано алгоритм цибулевої маршрутизації з однією відмінністю – шифрується не увесь пакет, а лише ланцюг адрес. Такий підхід дає змогу безпечно та неочікувано передавати інформацію, оскільки маршрут передачі заздалегідь визначено клієнтом, а сам маршрут надійно зашифровано. Модуль додатків є най-

вищим модулем у мережі і відповідає за роботу сервісних додатків. Його функції: створення запиту на виконання додатка; запуск додатка; комунікація між додатком та вузлом; комунікація між додатком та клієнтом; завершення роботи додатка. Оскільки запуск сторонніх додатків є небезпечною процедурою, додатки виконуються у спеціальному ізолюваному просторі. Модель системи під час виконання додатка зображена на рисунку 4. Додатки працюють за децентралізованою схемою. Додаток не має доступу до мережі безпосередньо, оскільки в ізолюваному середовищі він заблокований.

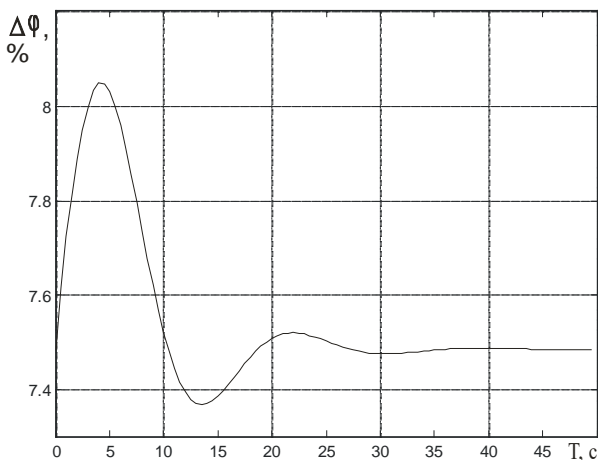


Рис. 4. Модель системи з віртуальним каналом

Для виконання запиту до мережі додаток має довести право на володіння цим ресурсом. Тому під час публікації додатка необхідно вказати, до яких ресурсів він мусить мати доступ. Вузол, що публікує додаток, перевіряє володіння ресурсом, зчитуючи попередньо задану послідовність символів з попередньо вказаного файлу. Якщо файл прочитати не вдалося або послідовність інша заявка на публікацію відхиляється. У разі успішного підтвердження додаток публікується разом з переліком підтверджених ресурсів. Для того щоб зробити запит додаток надсилає запит вузлу, на якому працює. Вузол перевіряє, чи є ресурс підтвердженим. Якщо підтверджено – запит додається у чергу запитів до ресурсів. Кожну секунду вузол може виконати обмежену кількість запитів, тому запити виконуються у режимі FIFO. Після виконання запиту вузол надсилає його додатку.

Висновки. У цій роботі вдосконалено процес роботи сервісних додатків у децентралізованих системах, створено модель децентралізованої мережі, а також розроблено протокол системи підтримки обчислень у децентралізованих мережах. Авторами реалізовано методи взаємодії частин системи та компонентів додатків. Під час подальших досліджень планується вдосконалення розроблених методів та доопрацювання протоколу з метою підтримки більшої кількості мережних та сервісних функцій для збільшення кількості сценаріїв використання.

Список літератури:

1. Mobile Ad hoc Networking (MANET). URL: <http://tools.ietf.org/html/rfc2501> (дата звернення: 10.10.18).
2. A Next-Generation Smart Contract and Decentralized Application Platform. URL: <https://github.com/ethereum/wiki/wiki/White-Paper> (дата звернення: 10.10.18).
3. Ахметов Б.С., Корченко А.Г., Сиденко В.П. Прикладная криптология: методы шифрования. Алматы: КазННТУ им. К.И. Сатпаева, 2015. 496 с.
4. Eastlake D., Hansen T. US Secure Hash Algorithms. 2006. URL: <https://tools.ietf.org/html/rfc4634> (дата звернення: 10.10.18).
5. Ship M., Yiqun L. Cryptanalysis of Twofish (II). URL: <https://www.schneier.com/twofish-analysis-shiho.pdf> (дата звернення: 10.10.18).
6. Rivest R., Shamir A., Ademan L. Cryptographic communications system and method. URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/49/43/9c/b155bf231090f6/US4405829.pdf> (дата звернення: 10.10.18).
7. Rescorla E. Diffie-Hellman Key Agreement Method. URL: <https://tools.ietf.org/html/rfc2631> (дата звернення: 10.10.18).
8. Хайнеман Д., Поллис Г., Селков С. Алгоритмы. Справочник с примерами на C, C++, Java и Python. 2017. М: Альфа-книга. 434 с.
9. Быков А.Ю. Решение задач на языках программирования Си и Си++. 2017. М: МГТУ им. Н. Э. Баумана. 248 с.
10. Recommendation for Pair-Wise Key Establishment Schemes Using Discrete Logarithm Cryptography. 2007. URL: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/SP/nistspecialpublication800-56a.pdf> (дата звернення: 10.10.18).

ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННАЯ СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ВЫЧИСЛЕНИЙ

В работе проведен анализ существующих децентрализованных систем, способных поддерживать работу сервисных приложений, приведены этапы реализации системы по поддержке вычислений в децентрализованных сетях, а также этапы разработки протокола передачи и обработки информации для децентрализованных сетей различного назначения.

Ключевые слова: децентрализация, вычисления, сеть, алгоритм, шифрование, изолированная среда.

DECENTRALIZED SYSTEM OF THE SUPPORT COMPUTATIONS

The work analyzes the existing decentralized systems capable to support the work of service applications, presents the stages of implementation the system of supporting the computing in decentralized networks, as well as stages of development transmission protocol and processing of information for decentralized networks of different purposes.

Key words: decentralization, computation, network, algorithm, encryption, isolated environment.

УДК 621.311.25:621.039:661.654

Киселёва Н.И.

Одесский национальный политехнический университет

Погребной Я.С.

Одесский национальный политехнический университет

Беглов К.В.

Одесский национальный политехнический университет

РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ МОЩНОСТИ ЭНЕРГОБЛОКА АЭС С ВВЭР-1000 В РЕЖИМЕ Н

Энергоблоки АЭС с реакторами ВВЭР-1000, которые эксплуатируются на четырех АЭС, являются самыми мощными на территории Украины. В связи с тем, что существует несоответствие между выработкой и потреблением электрической энергии в энергосистеме страны в течение суток, а также в связи с тем, что суммарная доля установок, предназначенных для регулирования суточного графика нагрузки энергосистемы очень мала, становится актуальной адаптация действующих энергоблоков к новым специфическим условиям работы путем создания автоматизированной системы регулирования (АСР) мощности энергоблока, которая позволит эксплуатировать энергоблоки АЭС в маневренных режимах.

Ключевые слова: регулятор, программа регулирования, мощность, энергоблок, аксиальный офсет.

Постановка проблемы. Сегодня все украинские АЭС с ВВЭР-1000 эксплуатируются в режиме стабилизации мощности энергоблока на заданном уровне, хотя оборудование первого контура рассчитано на эксплуатацию в режиме маневрирования мощностью. Это прежде всего связано с тем, что в настоящее время маневрирование мощностью реакторной установки (РУ) осуществляется операторами в ручном режиме и только по требованию диспетчеров энергосистемы. Выполнение маневра операторами РУ в ручном режиме очень опасно, так как при управлении необходимо одновременно контролировать изменение многих нейтронно-физических и технологических параметров, что приводит к необходимости учитывать влияние человеческого фактора на безопасность АЭС.

Анализ последних исследований и публикаций. Авторы Т.В. Фощ, М.В. Максимов, М.В. Никольский написали статью на тему: «Анализ влияния методов управления мощностью энергоблока с водо-водяным реактором на аксиальный офсет». Статья посвящена анализу влияния методов управления мощностью энергоблока с ВВЭР-1000 в маневренном режиме на количественную меру устойчивости, а именно на величину аксиального офсета [3, с. 19–27].

Цель работы. Целью работы является разработка автоматизированной системы регулирования мощности энергоблока с постоянной средней температурой

теплоносителя, которая позволит эксплуатировать энергоблок в маневренных режимах суточного цикла для поддержания баланса мощности в энергосистеме Украины, исследовать свойства реактора ВВЭР-1000 как объекта управления с точки зрения присущих ему внутренних возмущений и влияния их на аксиальный офсет в маневренных режимах.

Основная часть. Энергоблок с реактором ВВЭР-1000 – самостоятельная часть атомной электростанции, которая представляет собой технологический комплекс для производства электроэнергии путем использования энергии, выделяемой при контролируемой ядерной реакции. Энергоблок работает на энергосистему с большим количеством потребителей электроэнергии.

Динамические процессы в генераторе практически безынерционные, поэтому электрическая мощность, отдаваемая в энергосистему, равна механической энергии на роторе турбины. Основная задача регулирования энергосистемы заключается в том, чтобы производить выработку электроэнергии в точном соответствии с непрерывно меняющимся потреблением.

Энергоблок с реактором ВВЭР-1000 имеет два контура.

Первый контур – радиоактивный. Теплота в реакторе выделяется за счет цепной реакции деления ядерного топлива под действием тепловых нейтронов.

Теплоносителем первого контура является вода под высоким давлением с растворенной в ней борной кислотой. В результате цепной реакции деления ядер урана-235 в ТВЭЛх реактора ВВЭР-1000 выделяется теплота. При прохождении теплоносителя через активную зону реактора происходит его нагревание за счет теплоотдачи от оболочек ТВЭЛов. Из реактора теплоноситель поступает в ПГ (рисунок 1.1).

Второй контур – нерадиоактивен. В ПГ теплоноситель через поверхность теплообмена отдаёт полученную в реакторе теплоту питательной воде парогенератора, которая находится под давлением 6 МПа. Охлажденный в ПГ теплоноситель с помощью ГЦН возвращается обратно в реактор.

Для управления и защиты ядерного реактора используют регулирующие стержни, которые можно перемещать по всей высоте активной зоны. При глубоком введении цепная реакция становится невозможной, поскольку нейтроны сильно поглощаются и выводятся из зоны реакции. Это происходит потому, что стержни выполнены из материала, который имеет высокую степень поглощения нейтронов.

На рисунке 1.1 изображена упрощённая тепловая схема АЭС с реактором ВВЭР-1000.

Сделав анализ известных программ, для реализации регулирования мощности энергоблока была выбрана комбинированная программа. Поскольку энергоблок работает в номинальном режиме, его мощность поддерживается в диапазоне 80–100% от номинала.

При больших нагрузках комбинированная программа поддерживает постоянной среднюю температуру теплоносителя первого контура, при этом давление пара во втором контуре в случае значительных отклонений находится в допустимых рамках.

Персонал энергоблока для увеличения/уменьшения мощности с помощью датчика 7 изменяет заданное значение и при этом регулятор мощности энергоблока 8 в зависимости от сигнала рассогласования формирует управляющую команду, которая передаётся механизму управления турбиной 9. Механизм управления турбиной 9 с помощью сервомотора 10 открывает/закрывает регулирующий клапан 3 турбины 4. Таким образом, электрическая мощность генератора будет меняться до тех пор, пока сигнал рассогласования не будет равен нулю.

Схема регулирования мощности энергоблока с ВВЭР-1000 по комбинированной программе при больших нагрузках изображена на рисунке 1.2.

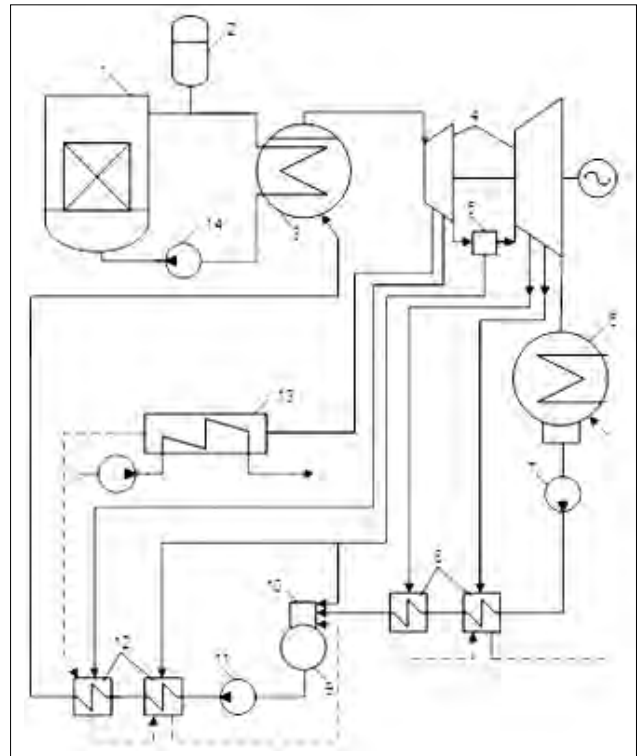


Рис. 1.1. Упрощённая тепловая схема энергоблока АЭС с реактором ВВЭР-1000:

- 1 – реактор; 2 – компенсатор объема;
- 3 – парогенератор; 4 – паровая турбина;
- 5 – турбинный сепаратор; 6 – конденсатор;
- 7 – конденсаторный насос; 8 – подогреватели низкого давления; 9 – деаэрационный бак; 10 – деаэрационная колонка; 11 – питательный насос; 12 – подогреватели высокого давления; 13 – сетевой подогреватель;
- 14 – циркуляционный насос

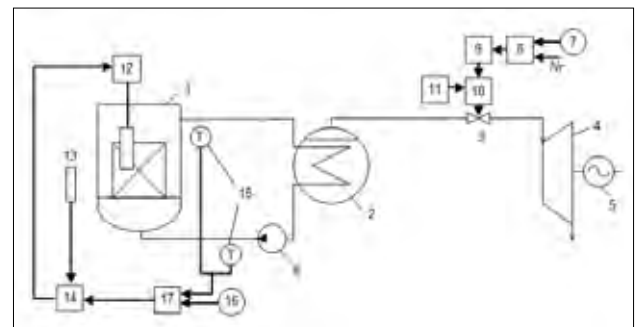


Рис. 1.2. Принципиальная схема регулирования мощности энергоблока с реактором ВВЭР-1000, которая реализует комбинированную программу регулирования при больших нагрузках:

- 1 – реактор; 2 – парогенератор; 3 – регулирующий клапан турбины; 4 – турбина; 5 – генератор;
- 6 – главный циркуляционный насос; 7 – задатчик электрической мощности генератора; 8 – регулятор мощности энергоблока; 9 – механизм управления турбиной; 10 – сервомотор; 11 – регулятор частоты вращения турбины; 12 – приводы регулирующих стержней; 13 – ионизационная камера; 14 – регулятор нейтронной мощности реактора; 15 – датчики температуры теплоносителя первого контура; 16 – датчик средней температуры теплоносителя первого контура; 17 – регулятор средней температуры теплоносителя первого контура

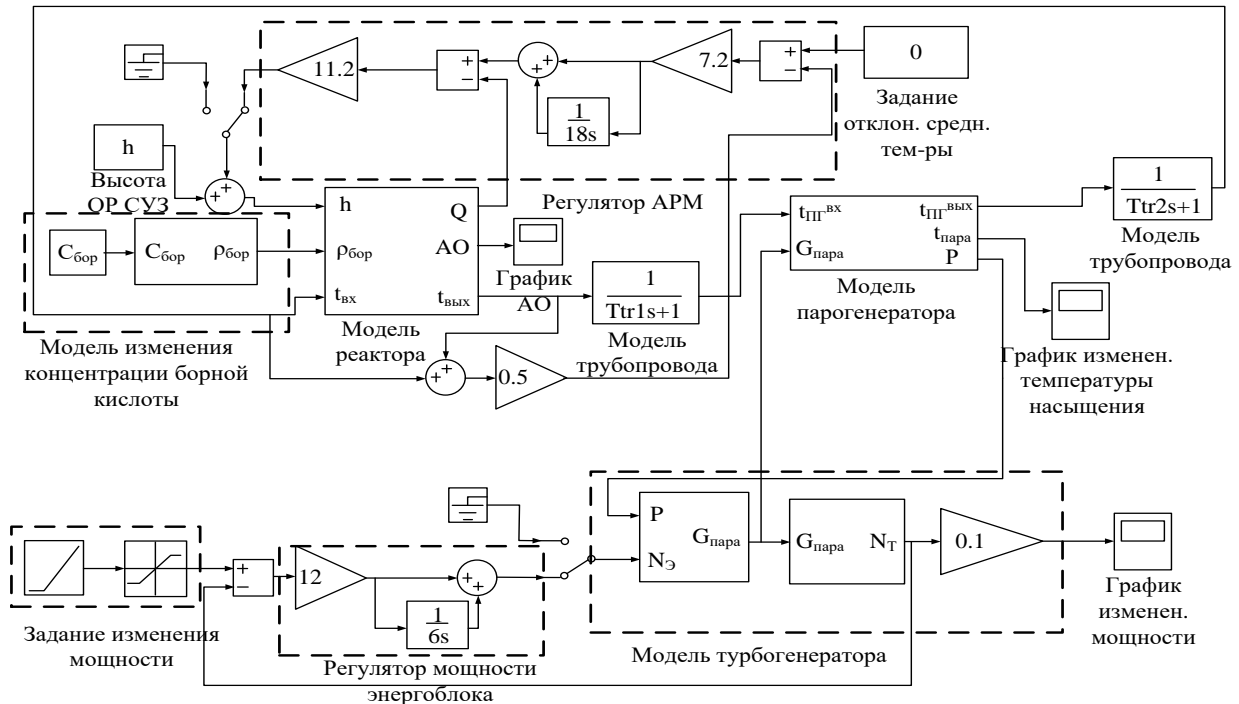


Рис. 1.3. Моделирование автоматизированной системы регулирования мощности энергоблока

При открытии/закрытии регулирующего клапана турбины давление пара перед турбиной и в парогенераторе 2 уменьшится/увеличится, что, соответственно, приведёт к уменьшению/увеличению давления пара и температуры насыщения в парогенераторе, то есть количество тепла, отводимого вторым контуром, увеличится/уменьшится. Ранее описанные процессы приведут к тому, что температура теплоносителя первого контура на выходе из парогенератора уменьшится/увеличится. Вместе с ней уменьшится/увеличится и средняя температура теплоносителя.

Регулирование нейтронной мощности осуществляется с помощью автоматического регулятора мощности (АРМ). АРМ состоит из регулятора средней температуры теплоносителя первого контура 17 и регулятора нейтронной мощности 14. С помощью задатчика 16 и датчиков 15 средней температуры первого контура формируется сигнал рассогласования, тем самым регулятор средней температуры теплоносителя первого контура вырабатывает корректирующий сигнал на регулятор нейтронной мощности. Далее регулятор нейтронной мощности изменяет положение регулирующих стержней 12, что приводит к поддержанию постоянного значения средней температуры теплоносителя первого контура.

Регулирующее устройство АРМ-5С является частью системы регулирования мощности энер-

гоблока ВВЭР-1000 и предназначен для поддержания мощности реактора в соответствии с мощностью турбогенератора или стабилизации мощности реактора на заданном уровне.

Принцип работы АРМ-5С основан на непрерывном сравнении значений текущего регулируемого параметра (нейтронная мощность реактора, давление пара в главном паровом коллекторе второго контура) со значениями параметра, записанными в регуляторе и являющимися для него заданием. АРМ-5С воздействует на ОР СУЗ рабочей группы, приводя изменившийся параметр регулирования к заданному значению.

Устройство АРМ-5С обеспечивает следующие режимы работы:

- режим астатического поддержания нейтронной мощности (режим «Н»);
- режим астатического поддержания теплотехнического параметра воздействием на ОР СУЗ (режим «Т»);
- стерегающий режим поддержания теплотехнического параметра воздействием на ОР СУЗ (режим «С»).

Для выполнения основных функций в комплект АРМ-5С входят два регулятора: РРН и РРТ, каждый из которых состоит из трех независимых каналов. Для повышения надежности и помехоустойчивости выходной сигнал каждого регулятора формируется по мажоритарному принципу «2 из 3»,

т.е. воздействие от регулятора передается на ОР СУЗ только в том случае, если по крайней мере два канала из трех выдадут сигнал на перемещение ОР СУЗ в данном направлении. АСР мощности энергоблока АЭС с ВВЭР-1000, алгоритм управления которой реализует программу регулирования с постоянной средней температурой теплоносителя в АКЗ реактора в среде моделирования Simulink пакета Matlab, представлена на рисунке 1.3.

Выводы. Основной физической особенностью ВВЭР-1000, из которой вытекают несколько других, является тесная решётка ТВЭЛов, необходимость использования которой является неизбеж-

ной из-за нейтронно-физических свойств воды. В сочетании с хорошими теплофизическими свойствами воды это обеспечивает компактность активной зоны и высокие значения объёмного энерговыделения. Исходя из этого были исследованы свойства реактора ВВЭР-1000 как объекта управления с точки зрения присущих ему внутренних возмущений и влияния их на аксиальный офсет, разработана система регулирования мощности энергоблока с постоянной средней температурой теплоносителя, которая позволяет эксплуатировать энергоблок в маневренных режимах суточного цикла.

Список литературы:

1. Беркович В.М., Горохов В.Ф., Татарников В.П. О возможности регулирования мощности энергосистемы с помощью атомных электростанций. Теплоэнергетика. 1974. № 6. С. 16–19.
2. Максимов М.В. Метод оценки эффективности алгоритма маневра мощностью энергоблока с реакторами ВВЭР-1000. Известия вузов. Ядерная энергетика. 2008. № 4. С. 128–139.
3. Фощ Т.В. Анализ влияния методов управления мощностью энергоблока с водо-водяным реактором на аксиальный офсет / Т.В. Фощ, М.В. Максимов, М.В. Никольский. Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2014. № 2(8). С. 19–27.
4. Современные технологии управления: в 2 т. монография / под общ. ред. С.В. Куприенко; Sworld. Одесса: Куприенко С.В., 2012. 179 с.
5. Медведев Р.Б., Сангінова О.В. Оптимальне керування процесом зміни концентрації борної кислоти в теплоносії першого контуру АЕС з ВВЕР-1000. Наукові вісті Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». 2002. № 2 (22). С. 22.
6. Аниканов С.С., Дунаев В.Г., Митин В.И. Управление энергораспределением ВВЭР-1000 в маневренном режиме. Атомная энергия. 1993. Т. 75, № 1. С. 3–8.
7. Коренной А.А., Титов С.Н., Литус В.А., Неделин О.В. Управление аксиальным распределением поля энерговыделения в активной зоне ВВЭР-1000 при переходных процессах. Атомная энергия. 1998. Т. 88, № 4. С. 252–257.
8. Филимонов П.Е., Аверьянова С.П. Поддержание равновесного офсета – эффективный способ подавления ксеноновых колебаний в ВВЭР-1000. Атомная энергия. 2001. Т. 90, № 3. С. 231–233.

РОЗРОБКА АВТОМАТИЧНОЇ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ ПОТУЖНОСТІ ЕНЕРГОБЛОКА АЕС ІЗ ВВЕР-1000 У РЕЖИМІ Н

Енергоблоки АЕС з реакторами ВВЕР-1000, які експлуатуються на чотирьох АЕС, є найпотужнішими на території України. У зв'язку з тим, що існує суттєва невідповідність між виробленням і споживанням електричної енергії в енергосистемі країни протягом доби, а також у зв'язку з тим, що сумарна частка установок, призначених для регулювання добового графіка навантаження енергосистеми дуже мала, стає актуальною адаптація діючих енергоблоків до нових специфічних умов роботи шляхом створення автоматизованої системи регулювання (АСР) потужності енергоблока, яка дасть змогу експлуатувати енергоблоки АЕС у маневрених режимах.

Ключові слова: регулятор, програма регулювання, потужність, енергоблок, аксіальний офсет.

DEVELOPMENT OF AUTOMATIC SYSTEM FOR REGULATING THE POWER OF THE POWER UNIT OF THE WWER-1000 NPP IN THE MODE N

The power units of NPPs with WWER-1000 reactors, which are operated at four NPPs, are the most powerful in Ukraine. Due to the fact that there is a significant discrepancy between the generation and consumption of electrical energy in the country's power system during the day, and also due to the fact that the total share of plants designed to regulate the daily load curve of the power system is very small, the adaptation of existing power units to new specific working conditions by creating an automated control system (ASR) of the power unit, which will allow to operate the NPP power units in maneuverable power plants benches.

Key words: controller, control program, power, power unit, aksial offset.

УДК 621.311.25:621.039:661.654

Киселёва Н.И.

Одесский национальный политехнический университет

Погребной Я.С.

Одесский национальный политехнический университет

Беглов К.В.

Одесский национальный политехнический университет

РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ МОЩНОСТИ ЭНЕРГОБЛОКА АЭС С ВВЭР-1000 В РЕЖИМЕ Т

В настоящее время в Украине большая часть электроэнергии производится на атомных электростанциях (47%). Вклад тепловых электростанций составляет около 43%. Производство энергии из экологически чистых источников электроэнергии составляет около 7% всей производимой в стране энергии. Лидером производства электроэнергии среди украинских АЭС является Запорожская АЭС с реакторами ВВЭР-1000, которая имеет установленную мощность 6000МВт. Указанное несоответствие должен устранять автоматический регулятор мощности энергоблока, который предоставляет управляющее воздействие или на реактор, или на турбину в зависимости от режима работы энергоблока с требованием, чтобы надежность и безопасность энергоблока были снижены, а также чтобы экономическая эффективность энергоблока сохранялась на необходимом уровне.

Ключевые слова: регулятор, программа регулирования, мощность, энергоблок, аксиальный офсет.

Постановка проблемы. Основной задачей регулирования паросиловой установки является поддержание равенства между количеством производимой и потребляемой энергии. Несоответствие между выработкой энергии в реакторе и потреблением в турбине проявляется (для двухконтурной АЭС) с изменением давления и температуры теплоносителя в первом контуре и давления (температуры) насыщенного пара во втором контуре. Залогом надежной и безопасной эксплуатации энергоблока является устойчивость реактора при возмущениях как при работе с постоянным уровнем нагрузки, так и в маневренном режиме. Количественной мерой устойчивости реактора является аксиальный офсет (АО) – технологическая характеристика равномерности энерговыделения, поэтому мерой эффективности эксплуатации энергоблока с ВВЭР-1000 является минимизация отклонения АО.

Анализ последних исследований и публикаций. Авторы Т.В. Фощ, М.В. Максимов, М.В. Никольский написали статью на тему: «Анализ влияния методов управления мощностью энергоблока с водо-водяным реактором на аксиальный офсет». Статья посвящена анализу влияния методов управления мощностью энергоблока с ВВЭР-1000 в маневренном режиме на количественную меру устойчивости, а именно на величину аксиального офсета [3, с. 19–27].

Цель работы. Целью работы является разработка автоматизированной системы регулирования мощности энергоблока с постоянной поддержкой давления пара в главном паровом коллекторе, которая позволит эксплуатировать энергоблок в маневренных режимах суточного цикла для поддержания баланса мощности в энергосистеме Украины.

Основная часть. На любой АЭС различают теплоноситель и рабочее тело.

Назначение теплоносителя – отводить тепло, выделившееся в активной зоне реактора в результате деления ядерного топлива. Для надежной работы тепловыделяющих элементов реактора теплоноситель должен обладать высокой степенью чистоты. Поэтому контур теплоносителя на АЭС всегда является замкнутым. К этому обязывает также наличие радиоактивности в теплоносителе.

Рабочим телом для АЭС является водяной пар. Требования к чистоте рабочего тела также высоки. Поэтому контур рабочего тела также является замкнутым. Отсутствие замкнутости привело бы к большим затратам на водоподготовительные системы, при замкнутом контуре заполняют лишь незначительные потери рабочего тела.

Тепловая схема энергоблоков с реакторами ВВЭР-1000 (рис. 1) имеет четыре петли (четыре

парогенератора, четыре ГЦН, один реактор, один компенсатор давления), она моноблочная (один реактор – одна турбина).

Все теплотехническое оборудование подразделяются на реакторное, парогенераторное, турбогенераторное, конденсационные установки и конденсатно-питательный тракт, включая системы регенерации низкого и высокого давления и деаэрационно-питательную установку.

Теплоноситель – вода под давлением (без кипения) главным циркуляционным насосом (ГЦН) подается в реакторную установку (РУ), где она нагревается и далее поступает в парогенератор (ПГ), где передает свою тепловую энергию рабочего тела второму контуру. Поскольку вода практически несжимаемая, то для безопасной работы реактора на контуре циркуляции теплоносителя устанавливают компенсатор давления (КД), поддерживающий давление в первом контуре постоянным.

Контур рабочего тела является нерадиоактивным и называется вторым контуром. В парогенераторе вырабатывается пар, который по паропроводах поступает в турбину (Т), где при его расширении потенциальная и кинетическая энергия потока пара превращается в механическую энергию вращения вала турбогенератора. Механическая энергия, передаваемая на вал ротора генератора (Г) от вала турбины, преобразуется в электрическую энергию электромагнитным путем. Постоянный ток обмотки ротора возбуждает магнитный поток, под действием которого в обмотке статора наводится электродвижущая сила и возникает электромагнитная связь ротора со статором.

Турбина снабжена конденсационным устройством, сепарационным-пароперегревочным устройством (СПП) и регенеративной установкой для подогрева питательной воды.

Парогенератор, разделяющий первый и второй контуры, в равной степени принадлежит первому и второму контуру. Передача теплоты в парогенераторе через поверхность требует перепада температур между теплоносителем и рабочим телом. Стремление не допустить кипения в реакторе требует создания давления в первом контуре существенно выше давления во втором контуре. По этой причине параметры рабочего тела на двухконтурной АЭС с ВВЭР всегда ниже параметров теплоносителя.

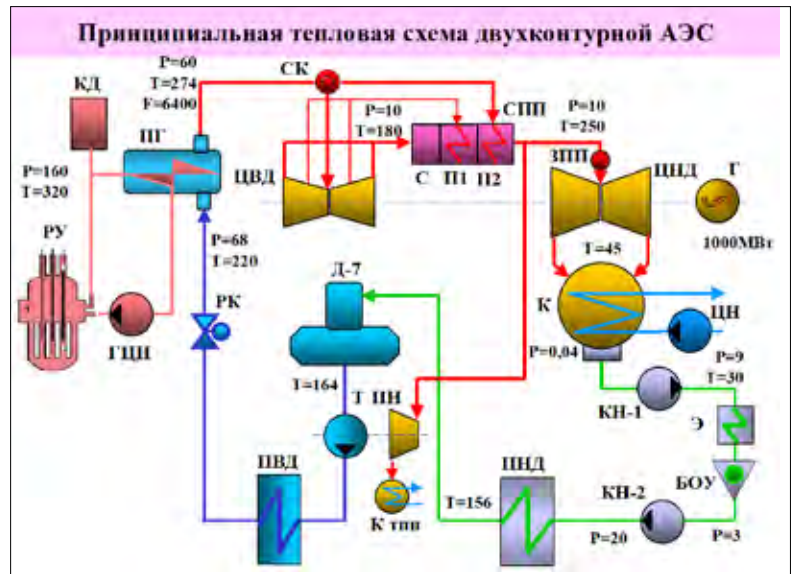


Рис. 1.1. Упрощённая тепловая схема энергоблока АЭС с реактором ВВЭР-1000

Упрощённая тепловая схема энергоблока АЭС изображена на рисунке 1.1.

При разработке и исследовании систем автоматического управления ядерными энергетическими установками (ЯЭУ) пользуются математическим моделированием. Для современных 2-контурных ЯЭУ с реактором типа ВВЭР математическая модель (ММ), учитывающая все сложные динамические процессы, описывается системой многих нелинейных дифференциальных уравнений. Решение и исследование такой системы затруднено. В тоже время для некоторых инженерных и учебных задач возможно использование упрощенных ММ, которые обеспечивают достаточную точность.

Технологическая схема 2-контурной АЭС изображена на рисунке 1.2, структурная схема энергоблока – на рисунке 1.3.

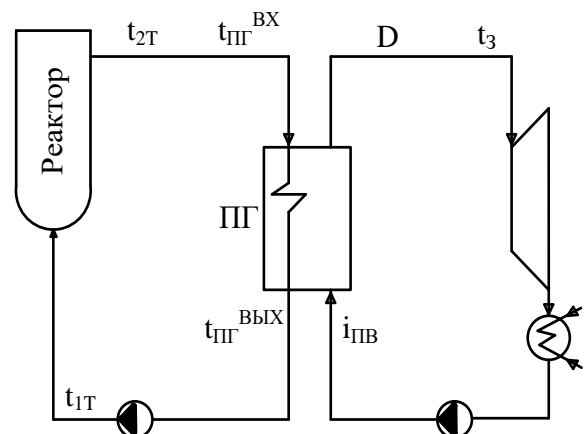


Рис. 1.2. Технологическая схема 2-контурной АЭС

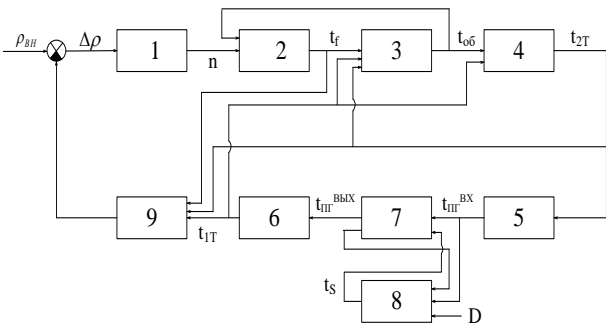


Рис. 1.3. Структурная схема энергоблока

Подставим найденные настройки регулятора и скорректируем их для получения необходимых переходных процессов.

При возмущении по каналу внешняя реактивность, относительная мощность реактора:

X1 = – первый динамический заброс;
 X2 = – второй динамический заброс;
 X3 = – третий динамический заброс;
 Время регулирования T = 300 с.
 Коэффициент колебательности:

$$\sigma = \frac{X_2}{X_1} * 100\% = \frac{0}{1.7} * 100\% = 0\% .$$

Степень затухания:

$$\Psi = 1 - \frac{X_3}{X_1} = 1 - \frac{0}{1.7} = 1 .$$

При возмущении по каналу внешняя реактивность, давление пара в ГПК:

X1 = – первый динамический заброс;
 X2 = – второй динамический заброс;
 X3 = – третий динамический заброс;
 Время регулирования T = 300 с.
 Коэффициент колебательности:

$$\sigma = \frac{X_2}{X_1} * 100\% = \frac{0}{-0.042} * 100\% = 0\% .$$

Степень затухания:

$$\Psi = 1 - \frac{X_3}{X_1} = 1 - \frac{0}{-0.042} = 1 .$$

При возмущении по каналу мощность генератора, относительная мощность реактора:

X1 = – первый динамический заброс;
 X2 = – второй динамический заброс;
 X3 = – третий динамический заброс;
 Время регулирования T = 300 с.
 Коэффициент колебательности:

$$\sigma = \frac{X_2}{X_1} * 100\% = \frac{0}{0.088} * 100\% = 0 .$$

Степень затухания:

$$\Psi = 1 - \frac{X_3}{X_1} = 1 - \frac{0}{0.088} = 1 .$$

При возмущении по каналу мощность генератора, давление пара в ГПК:

X1 = – первый динамический заброс;
 X2 = – второй динамический заброс;

X3 = – третий динамический заброс;
 Время регулирования T = 300 с.
 Коэффициент колебательности:

$$\sigma = \frac{X_2}{X_1} * 100\% = \frac{0}{-2.2} * 100\% = 0\% .$$

Степень затухания:

$$\Psi = 1 - \frac{X_3}{X_1} = 1 - \frac{0}{-2.2} = 1 .$$

Полученные переходные процессы регулирования изображены на рисунках 1.4–1.7.

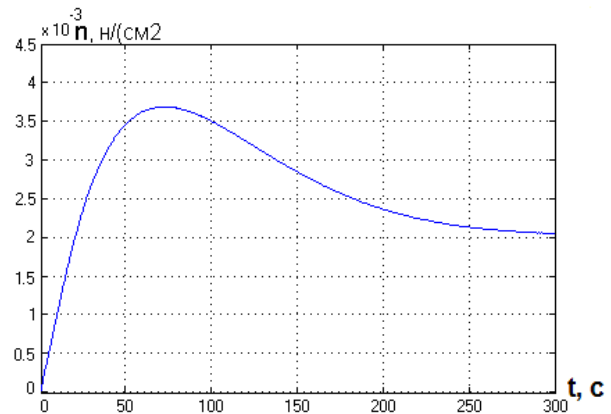


Рис. 1.4. Переходной процесс регулирования при нанесении возмущений по внешней реактивности

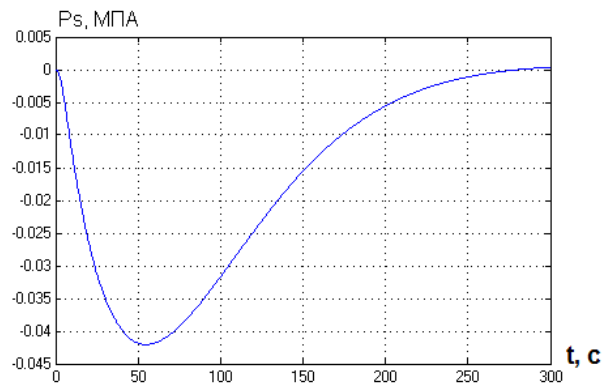


Рис. 1.5. Переходной процесс регулирования при нанесении возмущений по внешней реактивности

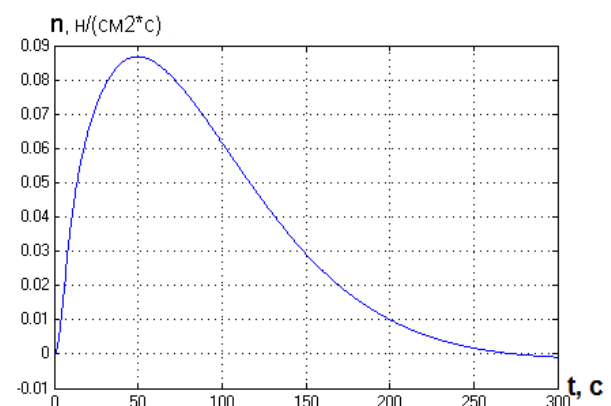


Рис. 1.6. Переходной процесс регулирования при нанесении возмущений по мощности генератора

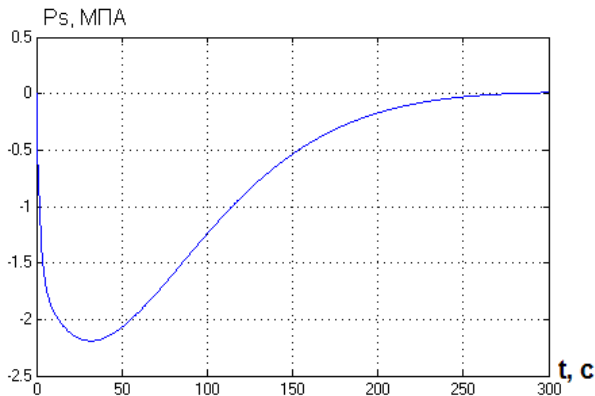


Рис. 1.7. Переходний процес регулювання при нанесенні возмущення по потужності генератора

Выводы. Регулировка мощности энергоблока с реакторами ВВЭР осуществляется с помощью автоматического регулятора мощности реактора АРМ и регулятора турбины РТ. АРМ – автоматическое регулирование мощности реактора в режиме поддержания заданного значения плотности нейтронного потока или давления в главном паровом коллекторе или в режиме ограничения мощности в зависимости от давления в главном паровом коллекторе. Данная группа функций обеспечивает формирование выходных управляющих сигналов «БОЛЬШЕ», «МЕНЬШЕ». Исходя из этого была разработана система регулирования мощности энергоблока с постоянной поддержкой давления пара в главном паровом коллекторе, которая позволит эксплуатировать энергоблок в маневренных режимах.

Список литературы:

1. Беркович В.М., Горохов В.Ф., Татарников В.П. О возможности регулирования мощности энергосистемы с помощью атомных электростанций. Теплоэнергетика. 1974. № 6. С. 16–19.
2. Максимов М.В. Метод оценки эффективности алгоритма маневра мощностью энергоблока с реакторами ВВЭР-1000. Известия вузов. Ядерная энергетика. 2008. № 4. С. 128–139.
3. Фощ Т.В. Анализ влияния методов управления мощностью энергоблока с водо-водяным реактором на аксиальный офсет / Т.В. Фощ, М.В. Максимов, М.В. Никольский. Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2014. № 2(8). С. 19–27.
4. Современные технологии управления: в 2 т. монография / под общ. ред. С.В. Куприенко; Sworld. Одесса: Куприенко С.В., 2012. 179 с.
5. Медведев Р.Б., Сангинова О.В. Оптимальне керування процесом зміни концентрації борної кислоти в теплоносії першого контуру АЕС з ВВЕР-1000. Наукові вісті Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». 2002. № 2 (22). С. 22.
6. Аниканов С.С., Дунаев В.Г., Митин В.И. Управление энергораспределением ВВЭР-1000 в маневренном режиме. Атомная энергия. 1993. Т. 75, № 1. С. 3–8.
7. Коренной А.А., Титов С.Н., Литус В.А., Неделин О.В. Управление аксиальным распределением поля энерговыделения в активной зоне ВВЭР-1000 при переходных процессах. Атомная энергия. 1998. Т. 88, № 4. С. 252–257.
8. Филимонов П.Е., Аверьянова С.П. Поддержание равновесного офсета – эффективный способ подавления ксеноновых колебаний в ВВЭР-1000. Атомная энергия. 2001. Т. 90, № 3. С. 231–233.

РОЗРОБКА АВТОМАТИЧНОЇ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ ПОТУЖНОСТІ ЕНЕРГОБЛОКА АЕС ІЗ ВВЕР-1000 У РЕЖИМІ Т

Нині в Україні велика частина електроенергії виробляється на атомних електростанціях (47%). Внесок теплових електростанцій становить близько 43%. Виробництво енергії з екологічно чистих джерел електроенергії становить близько 7% усієї виробленої в країні енергії. Лідером виробництва електроенергії серед українських АЕС є Запорізька АЕС з реакторами ВВЕР-1000, яка має встановлену потужність 6000 МВт. Вказану невідповідність має усувати автоматичний регулятор потужності енергоблока, котрий надає керуючий вплив або на реактор, або на турбину залежно від режиму роботи енергоблока з вимогою, щоб надійність і безпека енергоблока були знижені, а також, щоб економічна ефективність енергоблока зберігалася на необхідному рівні.

Ключові слова: регулятор, програма регулювання, потужність, енергоблок, аксіальний офсет.

DEVELOPMENT OF AUTOMATIC SYSTEM FOR REGULATING THE POWER OF THE POWER UNIT OF THE WWER-1000 NPP IN THE MODE T

Currently in Ukraine most of the electricity is generated in nuclear power plants (47%). The contribution of thermal power plants is about 43%. Energy production from environmentally friendly sources of electricity accounts for about 7% of all energy produced in the country. The leader in the production of electricity among Ukrainian NPPs is the Zaporozhnia NPP with WWER-1000 reactors, which has an installed capacity of 6000 MW. The indicated discrepancy should eliminate the automatic power regulator of the power unit, which provides control action to either the reactor or the turbine depending on the mode of operation of the power unit with the requirement that the reliability and safety of the power unit be reduced, and also that the economic efficiency of the power unit is kept at the required level.

Key words: controller, control program, power, power unit, aksial offset.

УДК 004.896

Климчук В.О.Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Корнага Я.І.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА РОЗПІЗНАВАННЯ ЕМОЦІЙ ЛЮДИНИ НА ВІДЕО ЗА ДОПОМОГОЮ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ

У сучасному світі інтелектуальні системи набирають все більшу популярність завдяки багатьом можливостям і ефективності використання. Адже є безліч завдань, де необхідне практичне вирішення із використанням інтелектуальних систем уже зараз: бізнес, економіка, медицина, робототехніка, біофізика тощо. Така велика кількість галузей застосування свідчить про те, що інтелектуальні системи – це унікальний набір для вирішення питань аналізу й обробки великого обсягу даних, вирішення задач різного рівня складності із використанням нейронних мереж. У цій статті буде розкрито роботу інтелектуальної системи розпізнавання емоцій людини за допомогою нейронних мереж. Також буде проведено аналіз роботи нейронних систем, виявлено, як можна навчити цю мережу розпізнавати емоції людини, як можна покращити роботу цього алгоритму за допомогою самонавчання нейронної мережі та які можуть бути помилки роботи нейронної мережі у разі некоректних вхідних даних. Загалом стаття має розкрити питання призначення нейронної мережі та її доцільність використання.

Ключові слова: нейронна мережа, нейрон, машинне навчання, алгоритм, інтелектуальна система.

Постановка проблеми. Натепер правоохоронним органам, прикордонним службам та органам безпеки у цілому дуже важко визначити на відеореєстрації, фотографіях або в живу емоції та наміри людини, а особливо небезпечної людини, щоб запобігти теракту або певному правопорушенню та порушенню законів з боку таких людей. Адже не кожен правоохоронець будь-якої структури може визначити емоції людини на відеореєстрації, що психологічно будує картинку такої людини, та її певні наміри, які вона хоче приховати (злість, брехню, сміливість, боязнь). Для вирішення таких питань та ситуацій можна використовувати нейронну мережу, яка може визначити емоції кожної людини на відеореєстрації для запобігання правопорушень загалом, що покращить мирне життя для кожного населеного пункту.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проаналізувавши ринок систем розпізнавання емоцій, було виявлено велику кількість компаній, які займаються розробкою та вдосконаленням таких систем, проте не всі системи задіяні в органах поліції. Наприклад, у США поліція під час важливих заходів використовує систему автоматичного сканування емоцій (AFR), яка підключається до камер спостереження з програмним забезпеченням від компанії NEC, для того

щоб на вході через турнікети контролю відеореєстрації могли просканувати емоції кожної людини, щоб виявити процент осіб, які виявляють емоції люті, злоби і які справді можуть викликати певні суперечки, спричинити бійку або теракт, і для цього процента осіб варто посилити охорону та ретельно за ними стежити, щоб сприяти мирному проведенню кожного важливого заходу. Проте така система дає багато хибних результатів, тому є безліч компаній, які вдосконалюють свої інтелектуальні системи та роблять їх особливими та провідними на ринку.

Постановка завдання. Інтелектуальна система розпізнавання емоцій людини складатиметься з додатка, який буде оброблювати вхідні відео (кадри з відео) для сканування та виведення емоцій зображених на них людей. Головне завдання нейронної мережі – розпізнавання емоцій людей на відео.

Виклад основного матеріалу. Мозок людини та її нервова система складаються з нейронів, з'єднаних нервовими волокнами. Між нейронами передаються електричні імпульси за допомогою нервових волокон. Всі дії, які відбуваються з живим організмом, всі роздратування шкіри, очей, біль, процеси мислення є взаємодією між нейронами. Будова біологічного нейрона зображена на рис. 1.

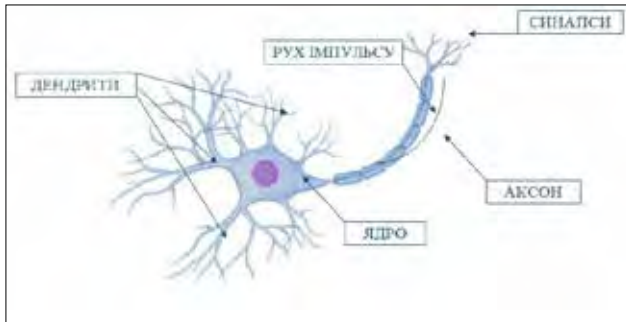


Рис. 1. Біологічний нейрон

Дендрити приймають імпульс нейрона;
 Аксон передає імпульс нейрона;
 Синапси – утворення, які впливають на силу імпульсу, для контакту аксона і дендрита.

Для проходження синапсу сила імпульсу змінюється певне число разів (вага синапсу). Коли до нейрона з кількох дендритів надходять імпульси, то вони підсумовуються. Якщо у сумарного імпульсу перевищено поріг, то нейрон переходить у стан збудження, формує власний імпульс і надсилає його далі по аксону. Поведінка відповідного нейрона може змінюватися, оскільки ваги синапсів мають властивість змінюватися з часом. Математична модель описаного процесу представлена таким чином (рис. 2):

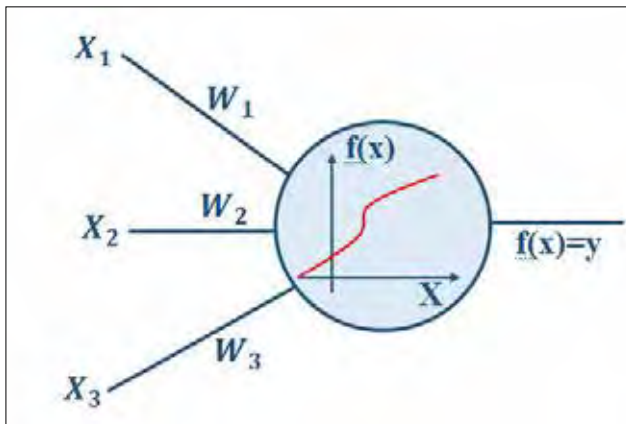


Рис. 2. Математична модель нейрона

Ця модель описує нейрон з трьома входами (дендритами), де синапси мають вагу w_1, w_2, w_3 , до яких відповідно надходить сила x_1, x_2, x_3 . До нейрона надходять імпульси x_1w_1, x_2w_2, x_3w_3 після проходження синапсів і дендритів.

Отриманий сумарний імпульс $x = x_1w_1 + x_2w_2 + x_3w_3$ нейрон перетворюється відповідно до передавальної функції $f(x)$.

$y = f(x) = f(x_1w_1 + x_2w_2 + x_3w_3)$ – сила вихідного імпульсу. Отримаємо набір чисел x_k (вектор) у вигляді входів. Далі нейрон видає певне число «у» на виході.

Штучний нейрон виглядає таким чином: на його вхід надходить безліч сигналів, кожен з яких одночасно є виходом іншого нейрона. Такий вхід множиться на відповідну вагу, потім дані підсумовуються, визначаючи рівень активації нейрона. Модель, яка реалізує цю ідею, представлена на рис. 3.

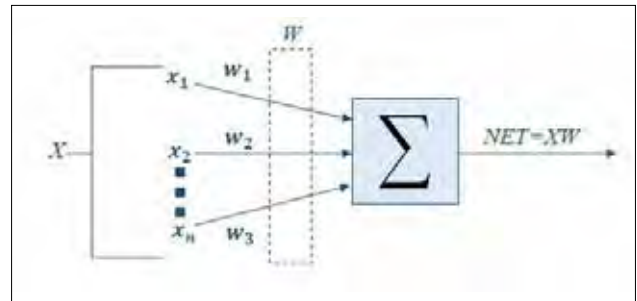


Рис. 3. Модель активації нейрона

Тут більшість сигналів x_1, x_2, \dots, x_n , надходить на вхід штучного нейрона, в сукупності ці сигнали позначаються X . Ці сигнали є аналогічними тим, що отримує на вході біологічний нейрон. Далі сигнали множаться на відповідну вагу w_1, w_2, \dots, w_n , потім підсумовуються в блоці Σ . Кожна вага дорівнює силі одного синаптичного зв'язку в біологічному нейроні. Вихід, який зазвичай називається NET , створюється в підсумовуючому блоці, де алгебраїчно складаються зважені елементи.

Сигнал NET перетворюється звичайною лінійною функцією – активаційною. Вона позначається F і дає вихідний сигнал OUT .

$$OUT = K(NET)$$

де K – постійна, порогова функція

$$OUT = 1, \text{ якщо } NET > T$$

$OUT = 0$ в інших випадках,

T – постійна порогова величина, яка більш точно моделює нейронну мережу.

Штучний нейрон з активаційною функцією зображено на рис. 4.

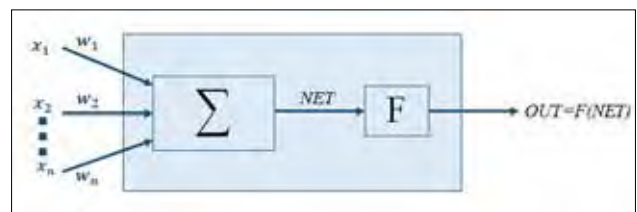


Рис. 4. Активаційна функція нейрона

Блок (позначений F) приймає сигнал NET і видає сигнал OUT .

F називається стискаючою функцією, якщо за будь-яких значень NET значення OUT належить деякому кінцевому інтервалу.

Модель штучного нейрона ігнорує більшість властивостей біологічного нейрона. Наприклад, затримки в часі, які впливають на динаміку системи.

Вхідні сигнали одразу ж породжують вихідний сигнал. Окрім того, штучний нейрон не враховує вплив синхронізуючої функції біологічного нейрона.

Проте слід зазначити виняткову подібність живого нейрона і штучного.

Для визначення місця нейронних мереж у галузі інформаційних технологій необхідно проаналізувати класифікацію штучних інтелектуальних систем.

Висновки. Реалізації інтелектуальної системи, здатної розпізнавати емоції людини, – це вирішення технічного і математичного складного завдання, що вимагає поглибленого вивчення предметної галузі, власного аналізу, вміння і навичок у обробці і виборі експериментальних даних, глибоких знань у галузі дискретної математики,

геометрії, програмування, а також психології і багатьох інших сферах науки.

Використання нейронних мереж у розробці інтелектуальної системи розпізнання емоцій людини дає змогу структурувати помилкові дані, похибки, прискорити процес обробки даних, оцінити адекватність середовища, в яке поміщена інформаційна модель нейронної мережі.

Аналізуючи експеримент, який наведений у цій статті, можна побачити, що алгоритм розпізнавання емоцій людини можна вдосконалювати за допомогою збільшення кількості випробувань цієї системи. Основним чинником такої системи є оптимізація алгоритму обробки емоцій на відео.

Ця інтелектуальна система може використовуватись у сферах, пов'язаних з безпекою суспільства, тобто громадян різних країн, що зменшить злочинність, теракти, порушення законів тощо. Отже, можна сказати, що завдяки штучним нейронним мережам можна покращити і полегшити життя кожної людини в нашому світі.

Список літератури:

1. Головкин В.А. Нейронные сети: обучения, организация и применение. М.: ИПРЖР. 2008
2. Градосельская Г.В. Сетевые измерения в социологии: учебное пособие. М.: Издательский дом «Новый учебник», 2004. 248 с.
3. Гундырев К.В. Искусственные нейронные сети в задачах диагностирования рельсовых цепей. Науч.-иссл. лабор. «Компьютерные системы автоматики». 2005.
4. Ефремова Е.А., Дунаев, Е.В. Применение нейронных сетей для прогнозирования финансовых временных рядов. Доклады ТУСУР. 2004.
5. Заенцев И.В. Нейронные сети: основные модели. Учебное пособие для физ. ф-та. Воронеж. 1999.
6. Иванов А.И. Нейросетевые алгоритмы биометрической идентификации. Изд-во: Радиотехника. 2006. 144 с.
7. Каллан Р. Основные концепции нейронных сетей. Изд-во: Вильямс. 2002. 287 с.
8. Кальченко Д.А. Нейронные сети на пороге будущего. КомпьютПресс, 2005.
9. Каширина И.Л. Нейросетевые технологии: учебно-методическое пособие для вузов. Изд-во ВГУ. 2008. 72 с.
10. Князев Б.А., Гапанюк Ю.Е. Распознавание аномального поведения человека. Инженерный журнал. 2013 г. 512 с.
11. Козин Н.Е., Фурсов В.А. Поэтапное обучение радиальных нейронных сетей. РФФИ. амер. фонд гражд. иссл. 2003.
12. Кочеткова А.С. Применение нейронных сетей для мониторинга безопасности. Серия 9: Исследования молодых ученых. 2007.
13. Крисилов В.А. Представление исходных данных в задачах нейросетевого программирования. Одесса: ОНПУ. 2003.

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА РАСПОЗНАВАНИЯ ЭМОЦИЙ ЧЕЛОВЕКА С ПОМОЩЬЮ НЕЙРОННОЙ СИСТЕМЫ

В современном мире интеллектуальные системы приобретают все большую популярность благодаря богатым возможностям и эффективности использования. Ведь существует множество задач, где необходимо практическое решение с использованием интеллектуальных систем уже сейчас: бизнес, экономика, медицина, робототехника, биофизика и многие другие. Такое большое количество областей применения говорит о том, что интеллектуальные системы – это уникальный набор для решения вопросов анализа и обработки большого объема данных, решения задач разного уровня сложности с использованием нейронных сетей. В данной статье будет раскрыта работа

интеллектуальной системы распознавания эмоций человека с помощью нейронных сетей. Также будет проведен анализ работы нейронных систем, выяснено, как можно научить данную сеть распознавать эмоции человека, как можно улучшить работу данного алгоритма с помощью самообучения нейронной сети, какие могут быть ошибки работы нейронной сети при некорректных входных данных. В целом статья должна раскрыть вопрос назначения нейронной сети и целесообразность ее использования.

Ключевые слова: *нейронная система, нейрон, машинное обучение, алгоритм, интеллектуальная система.*

INTELLECTUAL SYSTEM OF RECOGNITION OF HUMAN EMOTIONS BY NEURAL NETWORK

In the modern world intellectual systems gain the increasing popularity, thanks to rich opportunities and efficiency of use. There is a set of tasks where the practical decision with use of intellectual systems is necessary already now: business, economy, medicine, robotic technology, biological physics and many others. Such large number of scopes says that intellectual systems are a unique set for the solution of questions of the analysis and processing of large volume of data, the decision of tasks of different level of complexity with use of neural networks. In this article it will be opened questions of operation of intellectual system of recognition of emotions of the person by means of neural networks. Also the analysis of operation of neural systems will be carried out, it is revealed as it is possible to teach to recognize this network of emotion of the person as it is possible to improve operation of this algorithm by means of self-training of a neural network and what errors of operation of a neural network in case of malformed input data can be. In general article shall open a question of assignment of a neural network and its feasibility of use.

Key words: *neural system, neuron, machine learning, algorithm, intellectual system.*

УДК 621.313.12.001.57

Конущбаєва Т.В.

Одеський національний політехнічний університет

Беглов К.В.

Одеський національний політехнічний університет

АСР ПОТУЖНОСТІ ЕНЕРГОБЛОКА АЕС З ВВЕР-1000 ЗА УТРИМАННЯ СЕРЕДНЬОЇ ТЕМПЕРАТУРИ ПЕРШОГО КОНТУРУ ПОСТІЙНОЮ

Енергоблоки АЕС з реакторами ВВЕР-1000, які експлуатуються на чотирьох АЕС, є найпотужнішими на території України. У зв'язку з тим, що є суттєва невідповідність між виробленням і споживанням електричної енергії в енергосистемі країни протягом доби, а також у зв'язку з тим, що сумарна частка установок, призначених для регулювання добового графіка навантаження енергосистеми дуже мала, стає актуальною адаптація діючих енергоблоків до нових специфічних умов роботи шляхом створення автоматизованої системи регулювання (АСР) потужності енергоблока, яка дасть змогу експлуатувати енергоблоки АЕС у маневрених режимах. Нині всі українські АЕС з ВВЕР-1000 експлуатуються в режимі стабілізації потужності енергоблока на заданому рівні, хоча обладнання першого контуру розраховане на експлуатацію в режимі маневрування потужністю. Це насамперед пов'язане з тим, що натепер маневрування потужністю реакторної установки (РУ) здійснюється операторами в ручному режимі і тільки на вимогу диспетчерів енергосистеми.

Ключові слова: АЕС, перший контур, АКЗ, ВВЕР-1000, реакторна установка.

Постановка проблеми. Виконання маневру операторами РУ в ручному режимі дуже небезпечно, оскільки під час управління необхідно одночасно контролювати зміну багатьох нейтронно-фізичних і технологічних параметрів, що призводить до необхідності враховувати вплив людського фактора на безпеку АЕС.

Вирішенням цього завдання може стати створення АСР потужності енергоблока, яка дасть змогу експлуатувати енергоблок у режимі маневрування потужністю з вимогою, щоб надійність і безпека енергоблока були знижені, а також, щоб економічна ефективність енергоблока зберігалася на необхідному рівні [3, с. 35–40].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У статті «Автоматизована система регулювання потужності енергоблока для управління ЯЕУ в маневрених режимах з постійною температурою на вході в реактор» [6, с. 20–21] сказано, що аналіз властивостей реактора ВВЕР-1000 як об'єкта управління з точки зору властивих йому внутрішніх збурень і їх впливу на стійкість показав, що з усіх внутрішньо властивих реактору збурень на його стійкість у маневреному режимі впливають температурний та потужнісний ефекти реактивності, а також зміна реактивності, викликана отруєнням нестационарним ксеноном, яке в деяких випадках може привести до нестійкості реактора аж до його вимушеної зупинки.

Отже, для безпечної експлуатації енергоблока з реактором ВВЕР-1000 в маневреному режимі необхідно, щоб реактор ВВЕР-1000 перебував у стійкому стані і підтримувалася рівномірність енерговиділення в активній зоні реактора (АКЗ).

Формулювання цілей статті. Метою роботи є вивчення автоматизованої системи регулювання потужності енергоблока з постійною середньою температурою теплоносія, яка дасть змогу експлуатувати енергоблок у маневрених режимах добового циклу для підтримки балансу потужності в енергосистемі України.

Виклад основного матеріалу. Концентрація нейтронів АКЗ реактора:

$$\langle n(\tau) \rangle = \sum_{i=1}^{10} n_i(\tau) / 10, \quad (1)$$

де $n_i(\tau)$ – концентрація i -ї зони, см-3;

i – номер зони, .

У нанесенні на реактор збурення густина нейтронного потоку змінюється. Закономірність цих змін для кожної зони описується системою з 7 нелінійних диференціальних рівнянь першого порядку, що враховують 6 груп нейтронів, що запізнюються:

$$\begin{cases} \frac{dn_i}{d\tau} = \frac{(\rho(\tau) - \beta_{ef}) \cdot n_i(\tau)}{l} + \sum_{j=1}^6 \lambda_j \cdot C_j(\tau), \\ \frac{dC_j}{d\tau} = \frac{\beta_j \cdot n_i(\tau)}{l} - \lambda_j \cdot C_j(\tau), \end{cases} \quad (2)$$

де $\rho(\tau)$ – реактивність, у від. од.;

- β_{ef} – сумарна частка нейтронів, що запізнюються, у від. од.;
- β_j – частка нейтронів, що запізнюються j -ї групи, у від. од.;
- l – середній час життя покоління миттєвих нейтронів, с;
- λ_j – постійна радіоактивного розпаду попередників j -ї групи, с⁻¹;
- j – номер групи нейтронів, що запізнюються, $j=1 \dots 6$;
- $C_j(\tau)$ – ефективна концентрація ядер – попередників нейтронів, що запізнюються j -ї групи, см⁻³.

Для рішення приведеної системи диференціальних рівнянь у відхиленнях від номінальних значень потрібно задатися нульовими початковими значеннями для $n_i(\tau)$ і $C_j(\tau)$. Рішенням системи буде значення відхилення густини нейтронів для i -ї зони $\Delta n(\tau)$ [1, с. 264].

Модель кінетики реактора була реалізована в середовищі моделювання Simulink пакета Matlab (рисунок 1).

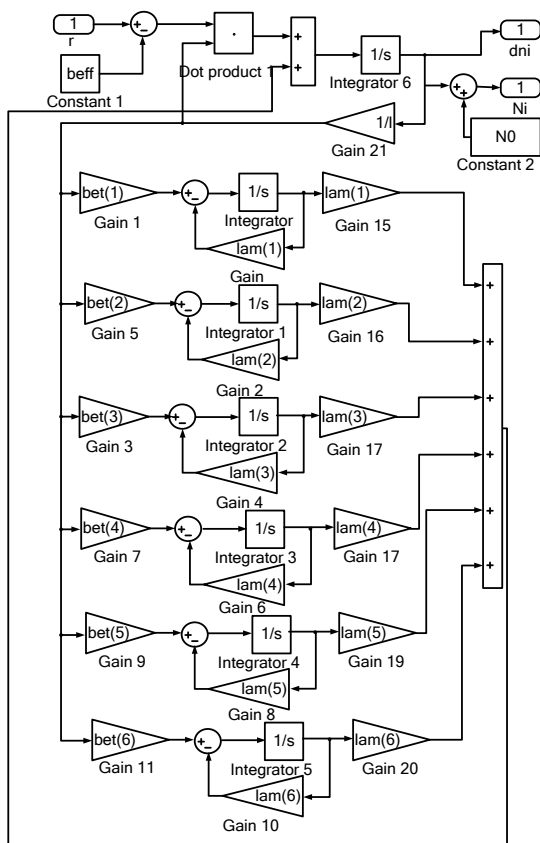


Рис. 1. Реалізація моделі кінетики реактора в середовищі моделювання Simulink пакета Matlab

Виділення тепла в АКЗ реактора, що супроводжує роботу реактора, зумовлене реакцією ділення ядер палива, а саме передачею кінетич-

ної енергії осколків ділення оточуючим атомам і молекулам середовища, сповільненням і радіаційним захопленням нейтронів у всіх компонентах АКЗ. Також воно зумовлене поглинанням миттєвого γ -випромінювання, а також β і γ - випромінювання осколків ділення і продуктів їх розпаду. Кожен складник вносить кількісний вклад у розподіл енергії і характеризується своїм тимчасовим розподіленням.

Основна частка теплової енергії вноситься кінетичною енергією осколків ділення (85%). Її перетворення на теплову енергію відбувається практично миттєво. Одночасно відбувається виділення енергії, пов'язане з β -випромінюванням (0,7%).

Енерговиділення в АКЗ реактора визначається як:

$$Q(\tau) = \sum_{i=1}^{10} Q_i(\tau). \quad (3)$$

Енерговиділення для i -ї зони АКЗ реактора описується таким рівнянням:

$$Q_i(\tau) = ((\varepsilon_n^M + \varepsilon_p^M) + (\varepsilon_n^H + \varepsilon_p^H) \cdot q_H(\tau)) \cdot n_i(\tau) \cdot v \cdot V_i \cdot \Sigma_f^5 \cdot E_f^5, \quad (4)$$

де ε_n^M – частка миттєвого локального тепловиділення,

ε_p^M – частка миттєвого розсіяного тепловиділення,

ε_n^H – частка поступового локального тепловиділення,

ε_p^H – частка поступового розсіяного тепловиділення,

v – швидкість нейтронів відносно ядер, см/с;

V_i – об'єм палива в АКЗ, см³;

Σ_f^5 – макроскопічний переріз ділення палива, см⁻¹;

E_f^5 – енергія ділення одного ядра, яка перетворюється на теплову енергію, Дж;

$q_H(\tau)$ – відносна потужність поступового тепловиділення Q_i .

Відносна потужність поступового енерговиділення $q_H(\tau) = q_{H1}(\tau) + q_{H2}(\tau) + q_{H3}(\tau)$, знаходиться з рішення системи диференціальних рівнянь [2, с. 512]:

$$\begin{cases} T_1 \cdot \frac{dq_{H1}}{d\tau} + q_{H1}(\tau) = k_1 \cdot \Delta n_i(\tau), \\ T_2 \cdot \frac{dq_{H2}}{d\tau} + q_{H2}(\tau) = k_2 \cdot \Delta n_i(\tau), \\ T_3 \cdot \frac{dq_{H3}}{d\tau} + q_{H3}(\tau) = k_3 \cdot \Delta n_i(\tau), \end{cases} \quad (5)$$

де $T_1, T_2, T_3, k_1, k_2, k_3$ – постійні часу і коефіцієнти передачі;

$\Delta n(\tau)$ – відхилення густини нейтронів для i -ї зони, см⁻³.

У відхиленнях енерговиділення для i -ї зони буде описано так:

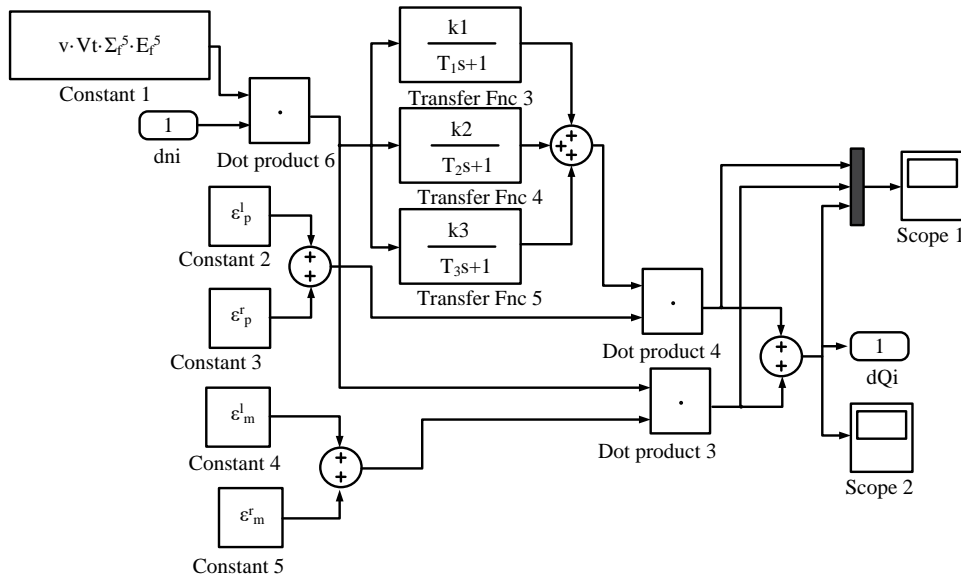


Рис. 2. Імітаційна модель енерговиділення

$$\Delta Q_i = ((\epsilon_p^m + \epsilon_p^r) + (\epsilon_p^1 + \epsilon_p^r) \cdot q_{II}(\tau)) \cdot \Delta n_i(\tau) \cdot v \cdot V_t \cdot \Sigma_f^5 \cdot E_f^5 \quad (6)$$

На рисунку 2 зображена імітаційна модель енерговиділення в середовищі моделювання Simulink пакета Matlab.

Рівняння балансу тепла для твєлів кожної зони АКЗ реактора має вигляд:

$$Q_i(\tau) = Cp_T \cdot m_T \frac{dt_i^T}{d\tau} + \alpha \cdot F \cdot (t_i^T(\tau) - t_i^{cp}(\tau)), \quad (7)$$

де Cp_T – питома теплоємність палива, $\frac{Дж}{кг \cdot К}$;
 m_T – маса палива, кг;
 α – коефіцієнт теплопередачі від поверхні твєлів до теплоносія, $\frac{Вт}{м^2 \cdot К}$;
 F – площа теплопередаючої поверхні твєлів, $м^2$;
 $t_i^T(\tau)$ – температура палива i -ї зони, $^{\circ}C$;
 $t_i^{cp}(\tau)$ – середня температура теплоносія i -ї зони, $^{\circ}C$ [4, с. 409].

Для отримання рішення диференціального рівняння у вигляді відхилення від номінального значення початкові умови $t_i^T(\tau)$ и $t_i^{cp}(\tau)$ були задані рівними нулю.

Рівняння балансу теплоносія кожної зони АКЗ реактора має вигляд:

$$\alpha \cdot F \cdot (t_i^T(\tau) - t_i^{cp}(\tau)) = Cp_B \cdot m_B \frac{dt_i^{cp}}{d\tau} + \frac{Cp_B \cdot m_B}{\tau_0} \cdot (t_i^{BIX}(\tau) - t_i^{BX}(\tau)), \quad (8)$$

де Cp_B – питома теплоємність теплоносія, $\frac{Дж}{кг \cdot К}$;
 m_B – маса теплоносія в АКЗ реактора, кг;
 $t_i^{BIX}(\tau)$ – температура теплоносія на виході із i -ї зони, $^{\circ}C$;

$t_i^{BX}(\tau)$ – температура теплоносія на вході в i -ю зону, $^{\circ}C$;

τ_0 – час проходження теплоносія через АКЗ реактора, с.

Позаяк теплоносій у АКЗ реактора рухається безперервно з постійною швидкістю від низу до верху, було прийнято, що температура на виході з однієї зони дорівнює температурі на вході у другу зону:

$$t_i^{BIX}(\tau) = t_{i+1}^{BX}(\tau). \quad (9)$$

Для рішення диференціального рівняння балансу теплоносія кожної зони АКЗ реактора воно було перетворене до вигляду:

$$\alpha \cdot F \cdot (t_i^T(\tau) - t_i^{cp}(\tau)) = Cp_B \cdot m_B \frac{dt_i^{cp}}{d\tau} + \frac{2 \cdot Cp_B \cdot m_B}{\tau_0} \cdot (t_i^{cp}(\tau) - t_i^{BX}(\tau)) \quad (10)$$

З врахуванням, що для кожної зони АКЗ реактора:

$$t_i^{cp}(\tau) = \frac{t_i^{BIX}(\tau) + t_{i+1}^{BX}(\tau)}{2}. \quad (11)$$

Рішенням диференціального рівняння буде зміна середньої температури теплоносія у кожній з 10 зон. Для отримання значень зміни температури теплоносія на виході з кожної зони можна використати останнє рівняння.

Для розрахунку абсолютних значень зміни температури теплоносія в АКЗ реактора по зонах були прийнято, що в початковий момент часу температура теплоносія на вході в АКЗ реактора $t_1^{BX} = 287 \text{ }^{\circ}C$ [5, с. 303].

На рисунку 3 зображена імітаційна модель передачі енергії, виділеної в результаті ділення,

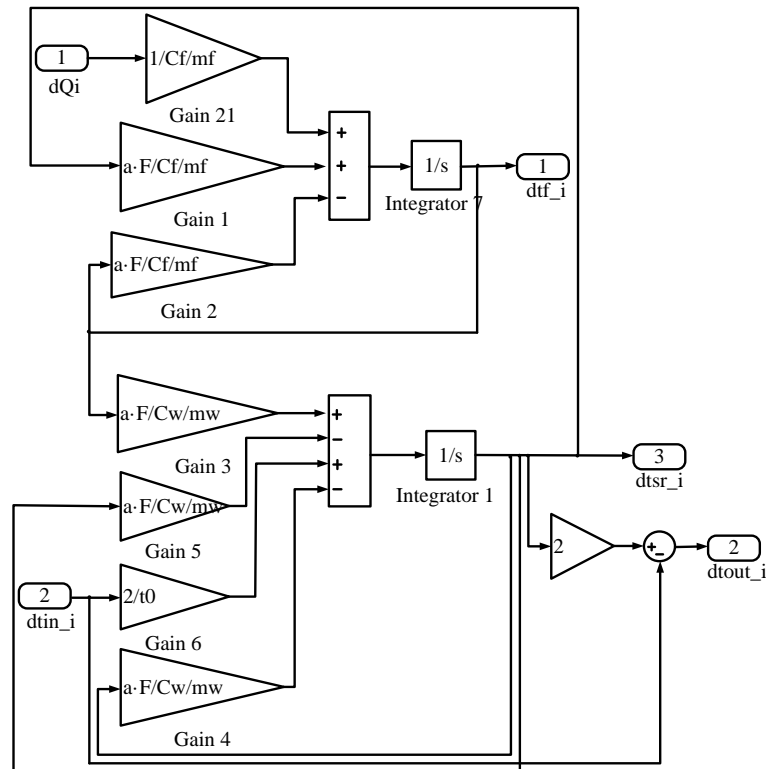


Рис. 3. Імітаційна модель передачі енергії паливу і теплоносію

паливу і теплоносію першого контуру в середовищі моделювання Simulink пакета Matlab.

Висновок. У роботі були отримані результати, які полягають у створенні автоматизованої системи керування потужністю енергоблока з постійною середньою температурою теплоносія, що дало змогу експлуатувати енергоблок у маневреному режимі добового циклу для підтримки балансу потужності в енергосистемі України.

Розроблено багатозонну модель реактора, яка включає ідентифіковану модель борного регулювання, що дає змогу контролювати зміну технологічних параметрів – теплової потужності, температури теплоносія на вході і виході з АКЗ реактора, температури твєлів по висоті АКЗ реактора. Розраховано технологічну характеристику розподілу нейтронного поля (аксіальний офсет) як кількісну міру сталості ядерного реактора.

Список літератури:

1. Аминов Р.З. АЕС з ВВЕР: режими, характеристики, ефективність: монографія / за ред. В.А. Хрусталева, А.С. Духовенский, А.И. Осадчий, Москва: Енергоатомвид., 1990. 264 с.
2. Бартоломей Г. Г. Основи теорії і методи розрахунку ядерних енергетичних реакторів: навчальний посібник / за ред. Г.Г. Бартоломей, Г.А. Бать, М.С. Алхутов, Москва: Енергоатомвид., 1989. 512 с.
3. Белл Д. Теорія ядерних реакторів, Москва, 1974. 35–40 с.
4. Верхивкер Г.П. Основи розрахунку і конструювання ядерних енергетичних реакторів, Одеса, 2008. 409 с.
5. Владимиров В.И. Практичні завдання з експлуатації ядерних реакторів, Київ, 1986. 303 с.
6. Тодорцев Ю.К., Цисельська Т.А., Нікольський М. В. Автоматизована система регулювання потужності енергоблока для управління ЯЕУ в маневрених режимах з постійною температурою на вході в реактор. ISSN 2073-6237. Ядерна та радіаційна безпека. 2013. № 4. С. 20–21.

**АСР МОЩНОСТИ ЭНЕРГОБЛОКОВ АЭС С ВВЭР-1000
ПРИ СОДЕРЖАНИИ СРЕДНЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЕРВОГО КОНТУРА ПОСТОЯННОЙ**

Энергоблоки АЭС с реакторами ВВЭР-1000, которые эксплуатируются на четырех АЭС, являются самыми мощными на территории Украины. В связи с тем, что существует несоответствие между выработкой и потреблением электрической энергии в энергосистеме страны в течение суток, а также в связи с тем, что суммарная доля установок, предназначенных для регулирования суточного графика нагрузки энергосистемы очень мала, становится актуальной адаптация действующих энергоблоков к новым специфическим условиям работы путем создания автоматизированной системы регулирования (АСР) мощности энергоблока, которая позволит эксплуатировать энергоблоки АЭС в маневренных режимах. Сегодня все украинские АЭС с ВВЭР-1000 эксплуатируются в режиме стабилизации мощности энергоблока на заданном уровне, хотя оборудование первого контура рассчитано на эксплуатацию в режиме маневрирования мощностью. Это прежде всего связано с тем, что в настоящее время маневрирование мощностью реакторной установки (РУ) осуществляется операторами в ручном режиме и только по требованию диспетчеров энергосистемы.

Ключевые слова: АЭС, первый контур, АКЗ, ВВЭР-1000, реакторная установка.

**ASR POWER PERFORMANCE OF NPP NPV WITH WWER-1000 UNDER STORAGE
OF THE SECOND TEMPERATURE OF THE FIRST CONTROL PERMANENT**

The power units of the WWER-1000 reactors, which are operated at four nuclear power plants, are the most powerful in Ukraine. Due to the fact that there is a significant discrepancy between the generation and consumption of electric energy in the country's energy system during the day, as well as due to the fact that the total share of installations intended to regulate the daily load schedule of the power system is very small, adaptation becomes actual operating power units to the new specific operating conditions by creating an automated control system (ACS) of the power unit power that will allow the operation of power units of the NPP in maneuverable modes. Today all Ukrainian NPPs of WWER-1000 are operated in the mode of stabilization of the power unit at a given level, although equipment of the 1st circuit is designed for operation in power maneuvering mode. This, first of all, is due to the fact that currently maneuvering power of the reactor unit (RU) is carried out by operators in manual mode and only at the request of the power system controllers.

Key words: nuclear power plant, first circuit, AKZ, WWER-1000, reactor installation.

Лютенко Ю.М.

Одеський національний політехнічний університет

Ложечнікова Н.В.

Одеський національний політехнічний університет

УДОСКОНАЛЕНА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ТЕПЛОВИМ НАВАНТАЖЕННЯМ БАРАБАННОГО КОТЛА ДЛЯ СПАЛЮВАННЯ ГОРЮЧИХ КИСНЕВМІСНИХ ВУГЛЕВОДНЕВИХ ГАЗІВ

Для сучасної української держави перспективним напрямом модернізації та розвитку енергетичної галузі може стати реалізація заходів, які потребують малих загальних витратних та тих, що швидко окупаються та дають змогу без залучення значних коштів у найкоротші терміни зменшити споживання палива й електроенергії. До таких заходів можна віднести використання на наявних парових котлах, що працюють на органічному паливі, нових структурних схем систем автоматичного управління, які дадуть змогу без суттєвої модернізації обладнання використовувати як паливо горючі кисневмісні вуглеводневі гази. Проведені дослідження показали, що є можливість використання дешевого низькокалорійного кисневмісного вуглеводневого газу як заміну природного газу на енергетичних і теплокомунальних підприємствах України. Чисельні розрахунки показали, що одним з основних обмежувачих факторів з використання дешевого палива без істотної модернізації енергетичного обладнання є пропускна здатність регулюючого органу.

Ключові слова: автоматизована система регулювання, паровий котел, автоматизація, математична модель, передавальна функція.

Постановка проблеми. Згідно з експертним прогнозом зростання світової економіки попит на енергетичні ресурси може вирости на 36% з 2011 по 2030 рік. Ключовими факторами зростання енергоспоживання будуть зростання чисельності населення планети (до 8,3 млрд до 2030 року) і зростання глобального ВВП (в два рази порівняно з 2011 роком). Швидка індустріалізація й урбанізація країн з низьким і середнім рівнем доходу становитиме 70% від світового зростання ВВП і понад 90% зростання світового попиту на енергетичні ресурси. Логічне, пропорційне зростанню ВВП, збільшення попиту на енергію буде обмежене безперервним поліпшенням енергоефективності її використання. Зниження енергоемності виробництва буде забезпечене використанням відновлюваних енергоресурсів, сланцевих енергоносіїв і нових, більш досконалих технологій виробництва промислових товарів і переробки сировини в біоенергетичних системах [1, с. 109].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. О.В. Авдєєвою було проведено дослідження та опублікована стаття на тему: «Система екстремального регулювання горінням палива в котельній установці» [4, с. 167–174]. У результаті проведеного дослідження експериментально встановлено, що

зміна витрати палива від витрати повітря носить екстремальний характер та для забезпечення найбільш ефективного процесу горіння параметри палива та повітря мають відповідати точці екстремуму (мінімуму для витрати палива). Також проведені досліді на моделях показали, що комплексне введення алгоритму екстремального регулювання процесів горіння та налаштування функціональних підсистем теплоенергетичних АСУ ТП може значно підвищити енергоефективність цих об'єктів [4, с. 173]. Також натепер такий учений, як А.В. Бондаренко, має дисертацію на тему: «Підвищення ефективності горіння вуглеводневих газів в парогенеруючих установках за рахунок зміни відношення паливо-повітря», де результатом дослідження стали модель та метод регулювання потужністю, який є основою алгоритму управління будь-яким барабанним котлом з природною циркуляцією, характеризується використанням несертифікованих вуглеводневих видів палива, максимальною температурою горіння палива і мінімальними викидами продуктів горіння у зовнішнє середовище.

Проте нині залишається невирішеним питання експериментів таких систем та теорій на реальних об'єктах. Відсутні адекватні методи визначення максимальної ефективності методик та їх оцінки.

Постановка завдання. Для сучасної української держави перспективним напрямом модернізації та розвитку енергетичної галузі може стати реалізація заходів, які потребують малих загальних витратних та тих, що швидко окупаються та дають змогу без залучення значних коштів у найкоротші терміни зменшити споживання палива й електроенергії. До таких заходів можна віднести використання на наявних парових котлах, що працюють на органічному паливі, нових структурних схем систем автоматичного управління, які дають змогу без суттєвої модернізації обладнання використовувати як паливо горючі кисневмісні вуглеводневі гази.

Виклад основного матеріалу дослідження. Натепер в Україні на теплових електростанціях, оснащених барабанними котлами, промислових і теплофікаційних котельнь використовується типова автоматична система управління (АСУ) теплового навантаження (рис. 1). Завдання АСУ теплового навантаження полягає в підтримці заданого тиску перегрітої пари, коли барабанний котел працює в регулюючому режимі або заданої витрати перегрітої пари, коли котел працює в базовому режимі. Така АСУ, як правило, реалізується в двох модифікаціях – з сигналом щодо витрати палива, коли на пальникові пристрої подається рідке або газоподібне паливо з постійною теплотворною здатністю, і з сигналом щодо тепловиділення в котельній камері, коли використовується тверде паливо, або якісний склад рідкого або газоподібного палива не є постійним [3, с. 352].

Таблиця 1

Густина і теплотворна здатність штучних газів

Газ	Густина, кг/м ³	Теплотворна здатність, МДж/м ³
Коксовий	0,342	17,58
Сланцевий	1,040	13,85
Генераторний мішаний	1,141	5,15
Генераторний, отриманий за паро-кисневого дуття під тиском	0,576	15,70
Доменний	1,283	4,10
Газ, отриманий шляхом низькотемпературного коксування з бітумінозних вугілля	0,620	31,90
Газ анаеробного походження	1,16	20,86

Можливість АСУ теплового навантаження з сигналом щодо тепловиділення компенсувати внутрішні топкові збурення питомою теплотою згоряння палива обмежена пропускною здатністю регулюючого органу, яка не перевищує 20% від номінальної витрати природного газу. Також необхідно враховувати густину і теплотворну здатність штучних газів, які можуть відрізнятися від аналогічних властивостей природного газу ($\rho_{\text{пр}} = 0,68 \dots 0,85 \text{ кг/м}^3$, $Q_{\text{H}}^{\text{пр}} = 28 \dots 46 \text{ МДж/м}^3$) як у більший, так і в менший бік (табл. 1).

Максимальна об'ємна витрата газу, приведена до нормальних умов ($P = 1,033 \text{ кгс/см}^2$, $\theta = 0^\circ \text{C}$), через регулюючий орган (РО) визначається рівнянням:

$$Q_{\text{max}} = 535 K_9^{\text{max}} \sqrt{\frac{\Delta P_{\text{PO}} P_2}{\rho T_1 k'}}, \quad (1)$$

де K_9^{max} – максимальна пропускна здатність РО, м³/год., ΔP_{PO} – перепад тиску на РО, кгс/см², P_2 – тиск середовища після РО, кгс/см², ρ – густина газу, кг/м³, T_1 – температура газу перед РО, К, k' – коефіцієнт стисливості.

Оскільки K_9^{max} , P_2 , T_1 , k' у процесі роботи котельного обладнання практично не змінюються, то рівняння (1) можна записати у вигляді:

$$Q_{\text{max}} = K_{\text{PO}} \sqrt{\frac{\Delta P_{\text{PO}}}{\rho}}, \quad (2)$$

де K_{PO} – постійний коефіцієнт, що визначає максимальне споживання газу на пальникові пристрої залежно від перепаду тиску на РО і густини газу, м³/год. З урахуванням теплотворної здатності газу Q_{H}^{P} тепловиділення в котельній камері буде визначатися рівнянням:

$$Q_{\text{T}} = Q_{\text{H}}^{\text{P}} Q_{\text{max}} = Q_{\text{H}}^{\text{P}} K_{\text{PO}} \sqrt{\frac{\Delta P_{\text{PO}}}{\rho}}. \quad (3)$$

Якщо прийняти, що тиск газу в газопроводі підтримується постійним, то тепловиділення у котельній камері у разі повністю відкритого РО буде залежати тільки від густини газу і його теплотворної здатності. Відношення тепловиділення природного газу $Q_{\text{T}}^{\text{пр}}$ до тепловиділення штучного газу $Q_{\text{T}}^{\text{шт}}$ дає змогу визначити потенційну можливість використання наявного котельного обладнання для спалювання альтернативного газоподібного палива:

$$\frac{Q_{\text{T}}^{\text{пр}}}{Q_{\text{T}}^{\text{шт}}} = \frac{Q_{\text{H}}^{\text{пр}}}{Q_{\text{H}}^{\text{шт}}} \sqrt{\frac{\rho_{\text{шт}}}{\rho_{\text{пр}}}}. \quad (4)$$

У таблиці 2 представлені результати розрахунку відношення (4) для середньої густини ($\rho_{\text{пр}} = 0,765 \text{ кг/м}^3$) та середнього тепловиділення природного газу ($Q_{\text{H}}^{\text{пр}} = 37 \text{ МДж/м}^3$).

Таблиця 2
Відношення тепловиділення природного газу до тепловиділення штучного газу

Газ	Q_T^{nr} / Q_T^{mr}	Перевищення пропускної здатності, %
Коксовий	1,41	21
Сланцевий	3,11	191
Генераторний мішаний	8,77	757
Генераторний, отриманий за паро-кисневого дуття під тиском	2,04	84
Доменний	11,7	1050
Газ, отриманий шляхом низькотемпературного коксування з бітумінозних вугілляв	1,04	–
Газ анаеробного походження	2,18	98

Результати розрахунку показують, що тільки газ, отриманий шляхом низькотемпературного коксування з бітумінозних вугілляв, може бути використаний замість природного газу (додаткове відкриття регулюючого органу для забезпечення номінальної генерації пари становитиме 4%).

Таким чином, виникає науково-технічна задача з розширення (в бік збільшення) діапазону керуючого впливу автоматичної системи управління тепловим навантаженням з сигналом щодо теплоти з метою використання як палива горючих кисневмісних вуглеводневих газів, коли пропускна здатність регулюючого органу не в змозі забезпечити подачу на пальникові пристрої необхідної кількості такого газу.

Одним із способів збільшення пропускної здатності регулюючого органу є збільшення перепаду тиску на ньому. Технічно цього можна досягти, якщо газ подавати на пальники з допомогою компресора, який за рахунок підвищення тиску газу перед повністю відкритим регулюючим органом, збільшує витрату і таким чином компенсує його низьку теплотворну здатність і (або) велику густину.

Для вирішення поставленого завдання необхідно визначити структуру і параметри пристрою зв'язку (ПЗ) (рис. 1), який має управляти продуктивністю газового компресора таким чином, щоб після вичерпання пропускної спроможності РО компресор збільшив подачу газу в топкову камеру за сигналом від регулятора витрати палива і це не привело б до зниження якості регулювання (збільшення тривалості перехідного процесу і великим динамічним відхиленням тиску P_{mn} і витрати D_{mn}

перегрітої пари). Передбачається, що завдання з оптимального управління роботою димососа і дугтьового вентилятора вирішуються відповідними типовими АСУ та їх продуктивності щодо нагнітання повітря в топку і видалення димових газів досить для вирішення цих завдань.

Удосконалена АСУ теплового навантаження барабанного котла має забезпечити плавний перехід на подачу горючих кисневмісних вуглеводневих газів за допомогою компресора, коли регулятор палива максимально відкриє регулюючий орган. У цьому разі керуючий сигнал від регулятора палива, відповідно до якого до цього відбувалося переміщення регулюючого органу, має бути так змінений пристрій сполучення (ПЗ), щоб його реалізація за допомогою компресора не привела до істотної зміни властивостей об'єкта по регулюючому каналу. Відношення передавальної функції ділянки по каналу «зміна положення регулюючого клапана – тепловиділення в котельній камері» $W_{\Delta h_{PO} \rightarrow \Delta Q_F}(S)$ до передавальної функції ділянки по каналу «зміна продуктивності компресора – тепловиділення в котельній камері» $W_{\Delta n \rightarrow \Delta Q_F}(S)$ визначає вид ПЗ, коли управління здійснюється тільки одним барабанним котлом (рис. 1):

$$W_{PЗ}(S) = \frac{Q_T^{nr} K_{PO} (T_{mn} S + 1)}{Q_T^{mr} K_K \left(\frac{T_K}{K_K} S + 1 \right)} \quad (5)$$

З урахуванням малої інерційності газових компресорів і розташовуючи компресор якомога ближче до котельного устаткування передавальна функція ПЗ (5) може бути спрощена:

$$W_{PЗ}(S) \approx \frac{Q_T^{nr} K_{PO}}{Q_T^{mr} K_K} \quad (6)$$

Спрощена передавальна функція ПЗ є пропорційною ланкою, однак наявність у виразі (6) значення теплотворної здатності природного і горючого кисневмісного вуглеводневого газів накладають певні обмеження для використання такої АСУ – паливом має використовуватися один вид горючого кисневмісного вуглеводневого газу або АСУ має бути доповнена пристроєм і методом ідентифікації, який визначає умовну формулу і теплотворну здатність газу, що спалюється [2, с. 85].

У разі, коли в технологічну ділянку входять два і більше барабанних котлів частину з них переводять у базовий режим роботи (котли генерують постійну кількість пари), а інша частина працює в регулюючому режимі, підтримуючи постійним тиск перегрітої пари в загальному паропроводі [3, с. 352]. Застосування в цьому разі для кожного котла окремого газового компресора економічно недоцільно. Рішенням може бути використання

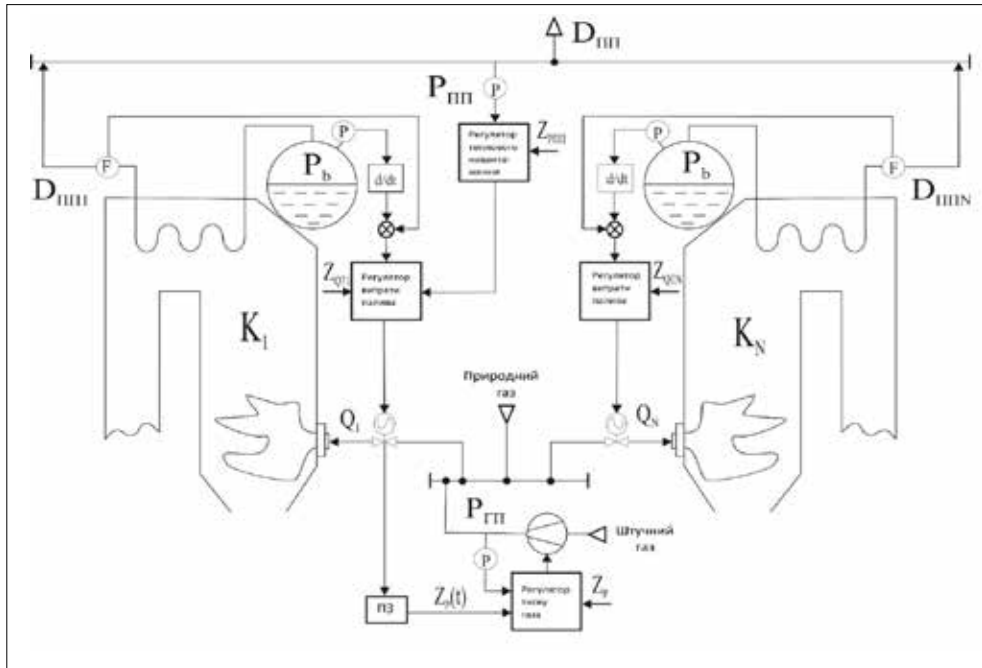


Рис. 1. Принципова схема АСУ групи котлів

одного продуктивного компресора, який має підвищувати тиск кисневмісного вуглеводневого газу в загальному газопроводі (рис. 1). Механізм управління компресором (МУК) відстежує становище РО котла, що працює в регулюючому режимі. У разі повного відкриття РО МУК через відповідне ПЗ змінює завдання регулятора тиску газу в газопроводі для плавного збільшення продуктивності компресора. На підставі (2) можна визначити функціональну залежність зміни завдання регулятора тиску газу:

$$\Delta P_{PO} = \rho \left(\frac{Q}{K_{PO}} \right)^2, \quad (7)$$

де Q – необхідна витрата газу на пальникові пристрої, m^3/c .

Оскільки регулятор розрідження підтримує постійним тиск димових газів у котельній камері, то ΔP_{PO} за повністю відкритого РО буде залежати тільки від тиску газу в газопроводі. Отже, шукана залежність для сигналу завдання регулятора тиску буде:

$$Z_p(t) = kQ^2(t). \quad (8)$$

Збільшення тиску в загальному газопроводі дасть змогу синхронно відновити продуктивність котлів, які працюють у базовому режимі.

Порівняльний аналіз роботи групи барабанних котлів у регулюючому режимі з використанням удосконаленої системи управління тепловим навантаженням

Моделювання перехідних процесів було проведено для двох барабанних котлів, що працю-

ють на загальний паропровід (рис. 2–4). При цьому один котел працював у регулюючому режимі і стабілізував тиск перегрітої пари в паропроводі, другий працював у базовому режимі з постійною продуктивністю пари. Як збурення розглядалося стрибкоподібне збільшення витрат на пальникові пристрої кисневмісного вуглеводневого газу, яке призводить до зменшення тепловиділення в котельній камері і, як наслідок, генерації пари на 25% від номінальної продуктивності.

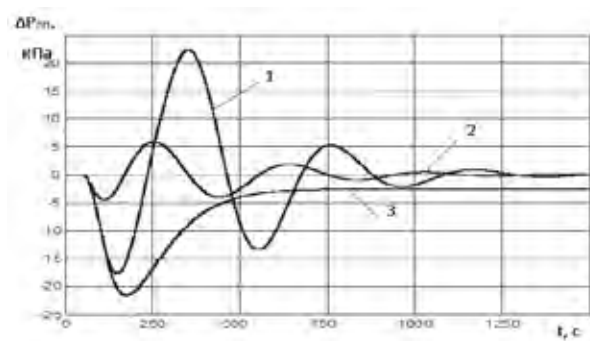


Рис. 2. Стабілізація тиску перегрітої пари у загальному паропроводі

Оскільки запас щодо пропускної здатності регулюючих органів становить 20%, то типова АСУ теплового навантаження не може відновити задане значення тиску перегрітої пари в загальному паропроводі (рис. 2, крива 3) і необхідну витрату пари до споживача (рис. 3, крива 3).

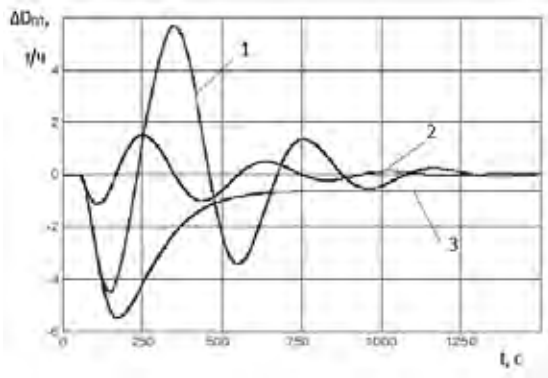


Рис. 3. Стабілізація витрат перегрітої пари у загальному паропроводі

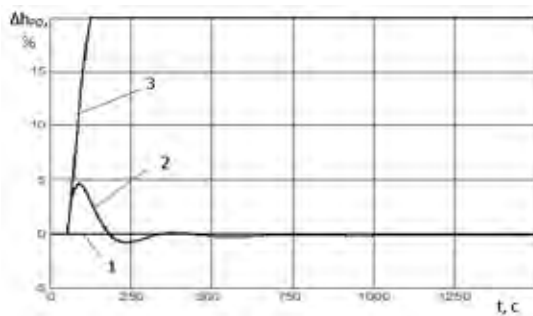


Рис. 4. Зміна положення РО барабанного котла в базовому режимі

У типовій системі управління регулятори витрати палива за сигналом щодо тепловиділення в камері згоряння повністю відкривають регулюючі органи (рис. 5–6, крива 3), але без додаткового підвищення тиску штучного газу в загальному газопроводі. Це не дає змогу повністю компенсувати зниження тепловиділення кожного котла.

Удосконалена АСУ теплового навантаження дає змогу відновити вихідні тиск і генерацію перегрітої пари (рис. 3–4) за рахунок збільшення подачі штучного газу в топку за допомогою газового компресора. У разі, коли продуктивність газового компресора регулюється за допомогою регулятора теплового навантаження через пристрій зв'язку (рис. 1), розраховане по (6), динамічне відхилення витрати пари і тривалість перехідного процесу в два рази більше (рис. 4, крива 1) порівняно зі схемою, в якій газовий компресор має власну систему управління (рис. 1).

Найкращі результати регулювання теплового навантаження забезпечує вдосконалена АСУ, в якій система управління компресором збільшує подачу штучного газу (рис. 6, крива 2), отримуючи сигнал завдання на зміну продуктивності $Z_p(t)$ від системи ідентифікації якісного складу кисневмісного вуглеводневого газу. Така система

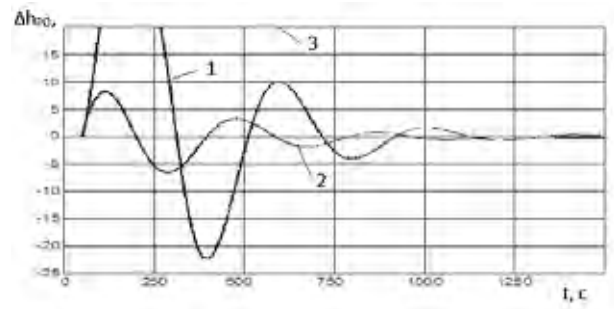


Рис. 5. Зміна положення РО барабанного котла в регулюючому режимі

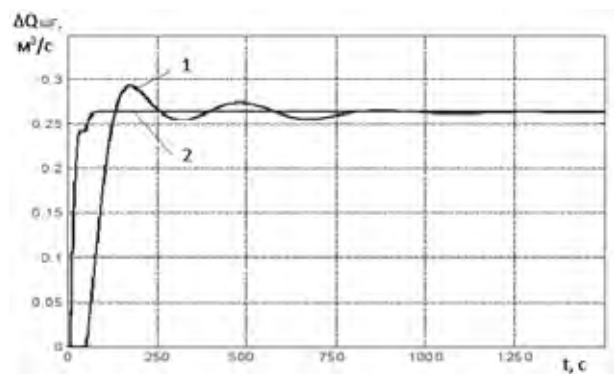


Рис. 6. Зміна витрати штучного газу до пальникових пристроїв

має бути малоінерційною і мати високу точність вимірювання складу штучного газу. Погіршення цих показників позбавить таку схему переваг порівняно зі схемою управління компресором безпосередньо від регулятора витрати палива.

Висновки. 1. Проведені дослідження показали, що є можливість використання дешевого низькокалорійного кисневмісного вуглеводневого газу як заміну природного газу на енергетичних і теплокомунальних підприємствах України. Чисельні розрахунки показали, що одним з основних обмежуючих факторів із використання дешевого палива без істотної модернізації енергетичного обладнання є пропускна здатність регулюючого органу.

2. Вирішення проблеми досягається шляхом підвищення тиску газу в газопроводі за допомогою компресора. Введення в технологічну схему газового компресора призводить до необхідності модифікації типової АСУ теплового навантаження.

3. Застосування методики класичної теорії автоматичного управління дало змогу визначити вид передавальної функції пристрою зв'язку між регулятором палива та компресором для одного котла, встановити функціональну залежність для регулятора тиску в газопроводі, коли група котлів працює на загальний паропровід.

Список літератури:

1. Рюль, К. Прогноз развития мировой энергетики до 2030 года. Вопросы экономики. № 5. 2013. С. 109–128.
2. Брунеткин, А.И., Максимов М.В. Метод определения состава горючих газов при их сжигании. Научный вестник Национального горничого университета. № 5. 2015. С. 83–90.
3. Плетнев, Г.П. Автоматизация технологических процессов и производств в теплоэнергетике. Москва. 2007. 352 с.
4. Авдеева О.В. Система экстремального регулирования горением топлива в котельной установке. Вестник Пензенского государственного университета. № 3 (11). 2015. С. 167–174.
5. Максимов М.В., Бондаренко А.В., Брунеткин А.И. Модель и метод определения условной формулы углеводородного топлива при сжигании. Восточно-Европейский журнал передовых технологий. № 6 (8). 2013. С. 20–27.

**УСОВЕРШЕНСТВОВАНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ
ТЕПЛОЙ НАГРУЗКОЙ БАРАБАННОГО КОТЛА ДЛЯ СЖИГАНИЯ
ГОРЮЧИХ КИСЛОРОДСОДЕРЖАЩИХ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ГАЗОВ**

Для современного украинского государства перспективным направлением модернизации и развития энергетической отрасли может стать реализация мероприятий, требующих малых общих расходов и тех быстрокупаемых, что позволяют без привлечения значительных средств в кратчайшие сроки уменьшить потребление топлива и электроэнергии. К таким мерам можно отнести использование в существующих паровых котлах, работающих на органическом топливе, новых структурных схем систем автоматического управления, которые позволят без существенной модернизации оборудования использовать в качестве топлива горючие добавки – углеводородные газы. Проведенные исследования показали, что существует возможность использования дешевого низкокалорийного кислородсодержащего углеводородного газа в качестве замены природного газа на энергетических и теплокоммунальных предприятиях Украины. Цифровые расчеты показали, что одним из основных ограничивающих факторов по использованию дешевого топлива без существенной модернизации энергетического оборудования является пропускная способность регулирующего органа.

Ключевые слова: автоматическая система регулирования, паровой котёл, автоматизация, математическая модель, передаточная функция.

**IMPROVED CONTROL SYSTEM OF THERMAL LOAD OF THE STEAM BOILER
FOR THE COMBUSTION OF COMBUSTIBLE OXYGEN CONTAINING
HYDROCARBON GASES**

For the modern Ukrainian state a promising direction of modernization and development of the energy sector can be the implementation of measures requiring small total expenditure and those that payback for themselves and allow without attracting substantial funds to reduce the consumption of fuel and electricity as soon as possible. Such measures include the use in existing steam boilers operating on organic fuel, new structural diagrams of automatic control systems, which will make it possible to use combustible additives hydrocarbon gases as fuel without significant equipment upgrades. Research have shown that it is possible to use cheap low-calorie oxygen-containing hydrocarbon gas as a substitute for natural gas in the energy and heat-utility enterprises of Ukraine. Numerical calculations showed that one of the main limiting factors for the use of cheap fuel without a significant upgrade of power equipment is the capacity of the regulatory authority.

Key words: automation control system, steam boiler, automation, mathematical model, transfer function.

Мастикаш О.В.

Національний університет «Львівська політехніка»

МОДЕЛЬ СОЦІАЛЬНОГО СЕРЕДОВИЩА ІНТЕРНЕТУ

У статті розроблено модель соціального середовища Інтернету, визначено поняття платформи соціального середовища Інтернету. Було здійснено поділ платформи на регіони, а саме: регіон особистої інформації, регіон приватних повідомлень, регіон налаштувань, регіони зв'язків між вузлами, регіони дописів, регіон мультимедійних даних, додаткові регіони. Визначено поняття актора соціального середовища Інтернету, виділені його атрибути та наведені правила організації зв'язків між сутностями платформи.

Ключові слова: віртуальна спільнота, соціальне середовище Інтернету, модель програмного забезпечення, регіон соціального середовища Інтернету.

Постановка проблеми. Дослідження в сфері соціального середовища Інтернету (далі – ССІ) та мережевого аналізу проводяться уже багато років. Але натепер немає чітко побудованої моделі платформи соціального середовища Інтернету (далі – ПССІ), яка б дала змогу розробити універсальний алгоритм аналізу сторінок для будь-якої ПССІ. Початковим та одним із основних і базових завдань у аналізі сторінки користувача є моделювання ССІ. Від архітектури моделі середовища залежить побудова алгоритму та принципів розбору сторінки. Моделювання соціального середовища Інтернету, з одного боку, дає розуміння процесу формування і функціонування, з іншого, дає змогу прогнозувати поширення інформації. Модель ССІ будується виходячи із основних принципів поведінки зареєстрованого у ній користувача.

Аналіз останніх досліджень. На сьогодні уже будувалися моделі соціального середовища Інтернету. Зокрема, автор у праці [1] навів короткий аналіз використання оптимізаційних (включаючи імітаційні) теоретико-ігрових моделей для опису взаємодії користувачів у соціальному середовищі Інтернету, також описав стохастичні моделі великих ПССІ виходячи з базових принципів поведінки агента в ССІ. Третя глава праці містить результати авторів та їхніх колег з побудови і дослідження теоретичних моделей інформаційного впливу, управління і протиборства в ССІ. Також можна виділити такі моделі [2]: статичні (моделі випадкових графів, модель Ердеша-Реньї, модель Рапопорта, модель Уотса-Строгаца), динамічні моделі (модель Прайса, модель «багатий стає багатшим»). У праці [3] порівнюються оптимізаційні та імітаційні моделі платформ соціальних середовищ Інтернету та їхніх властивостей,

будуються та розглядаються стохастичні моделі соціальних мереж, описуються вироджені та невивроджені соціальні мережі, безкінечні соціальні мережі. Автор у своїй праці «Огляд моделей аналізу соціальних мереж» [4] розглянув моделі на основі теорії графів, структурної еквівалентності та випадкових графів, виявив перспективні шляхи їх покращення, виокремив такі поняття, як: актор, зв'язок, діада, тріада, підгрупа, група, соціальна мережа, структурні та композитні змінні, мережі незалежності, соціальна пропозиція та соціальна роль. Автори у своїй праці [5] надають загальний опис наукових соціальних мереж, визначають поняття соціальної мережі як онлайн-сервісу, або платформи. У праці [6; 7] автори розглядають проблему виявлення різних шарів взаємодії комплексних даних шляхом введення багатошарових стохастичних блочних моделей (SBM), узагальнення одношарових SBM, в яких розглядаються різні механізми агрегації шару.

Виклад основного матеріалу.

Визначення соціального середовища Інтернету. Характерною особливістю соціального середовища Інтернету є доступність даних та їхня зв'язаність [8; 9]. ССІ являє собою набір сутностей, що існують у межах деякої платформи:

$$SNI = \langle Platform, \{Entity_i\}_{i=1}^{N^{SNI}} \rangle, \quad (1)$$

де SNI соціальне середовище Інтернету, $Platform$ платформа соціального середовища Інтернету (ПССІ), $Entity_i$ сутність соціального середовища Інтернету.

Платформа соціального середовища Інтернету – це сервіс, який надає інтерфейс, функціонал та площадку для породження об'єктів ПССІ суб'єктами ПССІ та їхньої взаємодії. Як правило, на ПССІ реалізована тільки внутрішня взаємодія між суб'єктами. *Суб'єкт ПССІ* – це особа, органі-

зація або інший сервіс, що здійснює взаємодію із платформою через її функціонал, є її частиною та виступає у ролі незалежного вузла. *Об'єкт ПССІ* – це одиниця контенту, що породжується в результаті дій суб'єкта, зберігається на ПССІ та керується життєвим циклом або її автора, або самої платформи. Для суб'єкта характерні такі ознаки: персоніфікація, здатність породжувати зв'язки, впливати на наповнення ПССІ. Суб'єкт є ключовою одиницею ПССІ, без якої існування платформи є неможливим (це буде простий сайт). При цьому, з одного боку, платформа соціального середовища Інтернету формується індивідуумами, з іншого боку, ПССІ сама формує простір для комунікації її суб'єктів, визначає їхню поведінку.

Модель платформи соціального середовища Інтернету. ПССІ можемо представити таким чином:

$$Platform = \langle Regions, ConceptualSchema, \{Technical_i\}_{i=1}^{N^{PL}} \rangle, \quad (2)$$

де *Regions* регіони ПССІ, *ConceptualSchema* концептуальна схема ПССІ, *Technical* технічна компонента ПССІ.

Технічна реалізація ПССІ виглядає так:

$$Technical_i = \langle Server_i, DomainName_i, SoftwareImpl_i, Func_i \rangle, \quad (3)$$

де *Server_i* сервер, на якому функціонує ПССІ, *DomainName_i* доменне ім'я, *SoftwareImpl_i* програмна реалізація, *Func_i* функціонал ПССІ.

Сервери є таких типів: хостинг, віртуальний виділений сервер, дата центр, хмара.

Вибір типу сервера залежить від навантажень, які має витримувати сервер. *Доменне ім'я* – це унікальна адреса до ПССІ в межах протоколу HTTP. Програмна реалізація будується на різних мовах програмування та поділяється на дві частини:

$$SoftwareImpl_i = \langle Backend_i, FrontEnd_i \rangle, \quad (4)$$

де *Backend_i* серверна частина сервісу, *FrontEnd_i* клієнтська частина сервісу.

Серверна частина включає в себе компоненти, які дають змогу ПССІ функціонувати:

$$Backend_i = \langle DB_i, Frameworks_i, Cache_i, Session_i, API_i, Other_i \rangle, \quad (5)$$

де *DB_i* сховище даних, *Frameworks_i* фреймворки, *Cache_i* система кешування, *Session_i* сесія, *API_i* інтерфейс прикладного програмування, *Other_i* інший функціонал.

Бази даних можуть бути як реляційними (Oracle, MySQL, MsSql), так і нереляційними (об'єктні, blockchain тощо). Також дані зберігаються в сесіях користувачів, у кеші на клієнті та сервері і в інших технологіях (elastic pool, map reduce, Azure search тощо). Додатковий функціонал залежить від вибору підходу реалізації ПССІ (SMTP, Twilio, MVC).

$$FrontEnd_i = \langle HTML, Frameworks_i, JS, MobileApp_i \rangle, \quad (6)$$

де *HTML* мова тегів сторінки, *JS* JavaScript, *Frameworks_i* фреймворки, *MobileApps_i* мобільні додатки.

Інтерфейс ПССІ задає загальний вигляд платформи та правила навігації по ній. А також задає правила поєднання тегів сторінки, їхніх атрибутів і загальний вигляд ДОМ дерева сторінок. У інтерфейсі можуть бути приховані деякі компоненти, які присутні у функціоналі ПССІ. *Функціонал ПССІ* – це набір програмних засобів, через які її користувачі взаємодіють із самою платформою. Від функціоналу залежить, якого типу буде ПССІ. Якщо попередні дві частини платформи дають змогу її представити на логічному рівні, то технічні компоненти забезпечують функціонування ПССІ на фізичному рівні.

Регіони ПССІ. *Регіони ПССІ* – це окремі ділянки платформи. У кожного регіону є спеціальне призначення, де відображаються дані попередньо визначеного типу і вигляду.

$$Regions = \{Region_i\}_{i=1}^{N^{REG}}, \quad (7)$$

де *Region* регіон ПССІ.

Кожен регіон має своє призначення та задає шаблон вібраження і створення даних. Практично всі регіони є динамічними та постійно наповнюються даними:

$$Region_i = \left\langle \begin{array}{l} PersonalReg_i, PrivateMsgReg_i, SettingsReg_i, \\ RelationsReg_i, PublicationsReg_i, \\ MediaDataReg_i, AdditionalReg_i \end{array} \right\rangle \quad (8)$$

де *PersonalReg_i* регіон особистої інформації, *PrivateMsgsReg_i* регіон приватних повідомлень, *SettingsReg_i* – регіон налаштувань, *RelationsReg_i* регіони зв'язків між вузлами ПССІ, *PublicationsReg_i* регіони дописів, *MediaDataReg_i* регіон мультимедійних даних, *AdditionalRegs_i* додаткові регіони.

Регіон особистої інформації містить інформацію, яка дає змогу унікально охарактеризувати користувача ПССІ. Дані цього регіону переважно наповнює її власник. Регіон приватних повідомлень є доступним тільки автору повідомлення і тому, кому воно адресувалося. Повідомлення адресується користувачу або групі користувачів та може набувати таких станів: прочитане, непрочитане, створене, надіслане, ненадіслане. *Регіон налаштувань* дає змогу змінити правила відображення деяких частин персональної сторінки її власнику, а також частково налаштувати регіони ПССІ. Регіони зв'язків дають змогу зв'язати сторінку користувача ПССІ із іншими сторінками користувачів ПССІ, груп користувачів ПССІ та з її об'єктами. Регіони дописів задають регіони, де генерується

найбільший обсяг створеного контенту користувачами ПССІ. Наповнення цих регіонів повністю залежить від користувачів платформи. *Регіон мультимедійних даних* надає можливість відображати та зберігати мультимедійні дані: музика, фотографії, відео та файли інших типів.

Регіон особистої інформації поділений на зони:

$$PersonalReg_i = \{InfoZone_{ij}\}_{j=1}^{N^{INFO}} \quad (9)$$

де $InfoZone_{ij}$ зона регіону особистої інформації.

Зона регіону особистої інформації дає змогу самому користувачеві розміщувати інформацію попередньо визначеного характеру:

$$InfoZone_{ij} = \langle Constancy_{ij}, Info_{ij} \rangle, \quad (10)$$

де $Constancy$ – постійність інформаційної зони, $Info_{ij}$ – інформація зони.

Постійність інформаційної зони задає тип відображення даних цієї зони:

$$Constancy_{ij} = \langle Static_{ij}, Dynamic_{ij} \rangle, \quad (11)$$

де $Static_{ij}$ статичний характер, де інформація не міняється від моменту створення до видалення персональної сторінки, $Dynamic_{ij}$ динамічний характер, де інформація може бути змінена в будь-який момент часу.

Інформаційна зона регіону особистої інформації може містити дані.

$$InfoZone_{ij} = \langle Public_{ij}, Hidden_{ij}, Settings_{ij} \rangle, \quad (12)$$

де $Public_{ij}$ дані, видимі всіма, $Hidden_{ij}$ приховані дані, видимі тільки власнику, $Settings_{ij}$ дані, до яких користувач сам вказує рівень доступу.

Приватні повідомлення – це невіддільна частина будь-якої платформи. Зона приватних повідомлень надає площадку перегляду та керування особистими повідомленнями.

$$PrivateMsgsReg_i = \langle InterlocutorsZone_i, SpamZone_i, StatusMsgsZone_i, ChatZone_i \rangle, \quad (13)$$

де $InterlocutorsZone_i$ зона співрозмовників, $SpamZone_i$ зона заблокованих повідомлень, $StatusMsgsZone_i$ статус зона повідомлень, $ChatZone_i$ зона переписки.

Регіон приватних повідомлень включає зону, де відображається список співрозмовників, із якими уже створені чати – зона співрозмовників:

$$InterlocutorsZone_i = \{Interlocutor_{ij}\}_{j=1}^{N^{INTS}}, \quad (14)$$

де $Interlocutor_{ij}$ співрозмовник із яким уже велася переписка. Переважно тут відображається тільки логін користувача, текст та дата останнього повідомлення.

Зона переписки дає змогу переглядати, створювати та читати повідомлення. Ця зона є основою у регіоні приватних повідомлень та є найбільш інформативною:

$$ChatZone_i = \langle ReadeBlock_i, SeeBlock_i, WriteBlock_i \rangle, \quad (15)$$

де $ReadeBlock_i$ блок читання повідомлень, $WriteBlock_i$ блок написання повідомлень, $SeeBlock_i$ блок перегляду повідомлень.

Для того щоб надіслати повідомлення потрібно із блока перегляду перейти у блок написання повідомлення. Повідомлення можуть набувати різних станів:

$$StatusMsgsZone_i = \{StatusMsg_{ij}\}_{j=1}^{N^{STATUS}}, \quad (16)$$

де $StatusMsg_{ij}$ стан повідомлення.

Повідомлення від моменту створення до моменту отримання і прочитання користувачем можуть перебувати у різних станах:

$$StatusMsg_{ij} = \langle Readed_{ij}, New_{ij}, Sented_{ij}, Error_{ij}, InProcess_{ij}, \{Other_{ijm}\}_{m=1}^{M^{STATUS}} \rangle, \quad (17)$$

де $Readed_{ij}$ прочитане повідомлення, New_{ij} нове повідомлення, $Sented_{ij}$ відправлене повідомлення, $InProcess_{ij}$ повідомлення в обробці, $Error_{ij}$ помилка відправлення, $Other_{ijm}$ інший стан.

Статус зона повідомлень є динамічною, але не завжди відображається як окремий регіон. Статус повідомлення часто відображається в зоні відображень повідомлень.

Зона заблокованих повідомлень містить підозрілі повідомлення, які є небажаними для відкриття.

$$SpamZone_i = \{SpamMsg_{ij}\}_{j=1}^{N^{STPAM}}, \quad (18)$$

де $SpamMsg_{ij}$ заблоковане повідомлення. Переважно такі повідомлення зберігаються визначений проміжок часу (переважно 30 днів).

Регіон публікацій дає змогу працювати із колекцією публікацій. Публікація – це запис, створений користувачем із метою поділитися думкою із оточуючими. Дії із публікаціями можна здійснювати у конкретно визначених для цього зонах:

$$PublicationsReg_i = \{PublicationZone_{ij}\}_{j=1}^{N^{PUBS}}, \quad (19)$$

де $PublicationZone_{ij}$ зона публікації.

Зони публікацій дають змогу створювати, редагувати, читати та поширювати публікації. Для кожної дії відведена конкретна зона:

$$PublicationZone_{ij} = \langle CreatedZone_{ij}, New_{ij}, ReadedZone_{ij}, Error_{ij}, EditeZone_{ij}, ShareZone_{ij} \rangle, \quad (20)$$

де $CreatedZone_{ij}$ зона створення публікації, $ReadedZone_{ij}$ зона читання публікацій, $EditeZone_{ij}$ зона редагування публікації, $ShareZone_{ij}$ зона поширення публікації.

Редагування публікації доступне тільки її автору, включає такі можливості: редагування контенту, заголовка, видалення самої публікації. Редагувати не можна автора, дати створення та підписи публікації (коментарі, лайки тощо).

Регіон налаштувань дає змогу налаштувати ПССІ кожному її користувачу окремо:

$$SettingsReg_i = \langle ViewSettings_i, PermissionSettings_i, SectionSettings_i \rangle, \quad (21)$$

де $ViewSettings_i$ налаштування загального вигляду сторінки, $PermissionSettings_i$ налаштування приватності, $SectionSettings_i$ налаштування відображення регіонів сторінки.

Регіон зв'язків дає змогу формувати зв'язки сторінки користувача із іншими сторінками:

$$RelationsReg_i = \{ RelationReg_{ij} \}_{j=1}^{N^{RPUB}}, \quad (22)$$

де $RelationReg_{ij}$ налаштування загального вигляду сторінки.

$$RelationReg_{ij} = \langle DirectRelations_{ij}, InDirectRelations_{ij}, HiddenRelations_{ij} \rangle, \quad (23)$$

де $DirectRelations_{ij}$ зона прямих зв'язків, $InDirectRelations_{ij}$ зона непрямих (похідних) зв'язків, $HiddenRelations_{ij}$ зона прихованих зв'язків, $RecomendetRelations_{ij}$ зона рекомендованих зв'язків.

А також на ПССІ доступні додаткові регіони, які надають додатковий функціонал, а саме: здійснювати пошук необхідних вузлів платформи, здійснювати навігацію по самій платформі та виконувати інші дії.

$$AdditionalRegs_i = \left\langle \left\{ SearchReg_{ij1} \right\}_{j1=1}^{N^{SRCH}}, \left\{ TranslationReg_{ij2} \right\}_{j2=1}^{N^{TRNS}}, \left\{ MenuReg_{ij3} \right\}_{j3=1}^{N^{MENU}} \right\rangle, \quad (24)$$

де $SearchReg_{ij1}$ регіон пошуку об'єктів, $TranslationReg_{ij2}$ регіон трансляції, $MenuReg_{ij3}$ регіон меню (головне, контекстне).

Модель сутностей ПССІ. Платформа соціального середовища Інтернету надає площадку для взаємодії її користувачів.

$$Entity_i = \left\langle \left\{ Actor_{ij1} \right\}_{j1=1}^{N^{ACT}}, \left\{ Link_{ij2} \right\}_{j2=1}^{N^{LNK}}, \left\{ Action_{ij3} \right\}_{j3=1}^{N^{AC}} \right\rangle, \quad (25)$$

де $Actor_{ij1}$ актор ПССІ, $Link_{ij2}$ зв'язок між акторами, $Action_{ij3}$ дія в межах платформи, виконана користувачем.

Актор – це суб'єкт ПССІ, що взаємодіє із функціоналом ПССІ, генеруючи контент платформи. Суб'єктами виступають персони або чат боти, які можуть об'єднуватися в спільноти – групи об'єднаних персон.

$$Actor_{ij1} = \langle Person_{ij1}, Group_{ij1}, OutsideService_{ij1} \rangle, \quad (26)$$

де $Person_{ij1}$ користувач ПССІ, $Group_{ij1}$ група користувачів, $OutsideService_{ij1}$ сторонній сервіс.

Ключовими атрибутами кожної персони ПССІ є наявність унікального ідентифікатора, персональної сторінки та дописів, які вона поширює. Ідентифікатором може виступати адреса електронної пошти, номер телефону, П.І.Б або логін (придуманий користувачем псевдонім).

$$Person_{ij1} = \langle PId_{ij1}, PPage_{ij1}, PPublications_{ij1} \rangle, \quad (27)$$

де PId_{ij1} ідентифікатор користувача, $PPage_{ij1}$ сторінка користувача, $PPublications_{ij1}$ публікації користувача.

Ідентифікатор користувача розміщується в статичній зоні та є незмінним. Сторінка користувача формується із таких регіонів: регіон особистої інформації, регіон дописів, регіон зв'язків та регіон налаштувань.

Немає окремої сутності «чат бот». Він взаємодіє від імені персони платформи. Відрізнити чат бота від людини: періодичність, постійна активність, систематичність, закономірність.

Група виступає у ролі окремого актора, тому що вона має свою персональну сторінку і може зв'язуватися з іншими акторами та з ними комунікувати. Крім того, персона може належати до групи.

$$Group_{ij1} = \left\langle Owner_{ij1}, New_{ij}, \left\{ Person_{ij1n} \right\}_{n=1}^{N^{PRSN}}, GId_{ij1}, GPage_{ij1}, GPublications_{ij1} \right\rangle, \quad (28)$$

де $Owner_{ij1}$ власник групи, GId_{ij1} ідентифікатор групи, $GPage_{ij1}$ сторінка групи, $GPublications_{ij1}$ публікації групи.

Власник групи – це користувач, який є одним із акторів ПССІ, але має привілеї для редагування налаштувань групи та передачі повноважень іншим персонам.

Зв'язок між акторами задає відношення деякого типу. Кожне відношення має свої параметри:

$$Link_{ij2} = \langle Relation_{ij2}, Character_{ij2} \rangle, \quad (29)$$

де $Relation_{ij2}$ відношення між акторами, $Character_{ij2}$ характер відношення.

Відношення між акторами є направленими та, як правило, поділяються на 2 типи:

– Явно вказані: відношення типу «друзі» $Friends_{ij2}$ відношення «за інтересами» $ByInterest_{ij2}$ (відношення за деяким критерієм $ByInfo_{ij2}$ місце роботи, навчання, спільні інтереси тощо).

– неявно вказані $Implicit$ Формується непряме відношення, що виникає між акторами внаслідок поширення та обміну контенту (спільне фото, відео, хештег тощо):

$$Relation_{ij2} = \langle Friends_{ij2}, ByInterest_{ij2}, ByInfo_{ij2}, Implicit_{ij2} \rangle \quad (30)$$

$Friends_{ij2}$ відношення такого типу виникає, коли актори із двох сторін явно підтвердили зв'язок між собою. Таке відношення може виникнути тільки після спільної згоди сторін пов'язати свої сторінки. Згода пов'язати сторінки тільки однією стороною призведе до створення відношення за критерієм типу рекомендований друг.

Характер відношень задає такі критерії: налаштування відображення зв'язку, близькість зв'язку, важливість зв'язку.

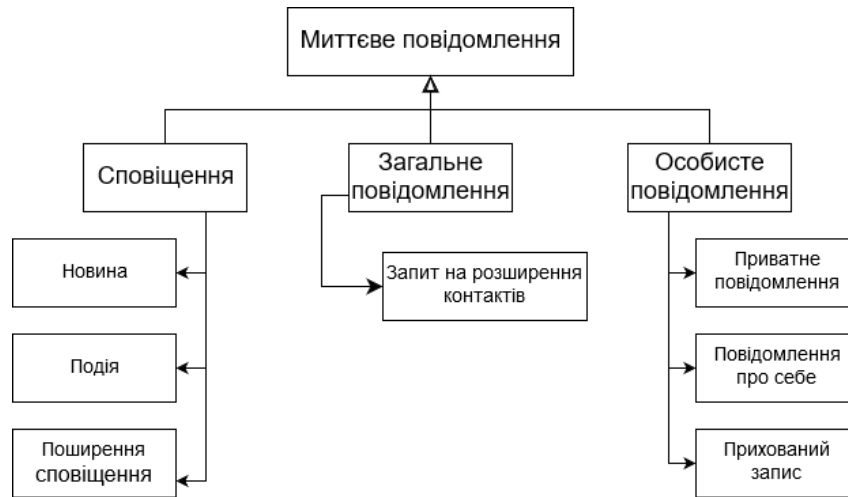


Рис. 1. Типи повідомлень ПССІ

Актори можуть мати одночасно декілька типів відношень між собою, наприклад: актори можуть пов'язати сторінки явним відношенням «друзі», а також вони можуть належати до однієї групи, що породить між ними неявно вказане відношення.

Актори можуть виконувати дії, що є комбінацією об'єктів суворо визначених типів.

$$Action_{ijz} = \langle Object, ObjectType \rangle, \quad (31)$$

де *ObjectType* тип породженого об'єкта.

$$ObjectType = \langle Notification, GeneralMessages, PersonalMessages \rangle, \quad (32)$$

де *Notification* – сповіщення, *GeneralMessage* – допис, *PersonalMessages* – особисті повідомлення.

Результатом взаємодії між акторами є породження об'єктів платформи. Відношення між акторами ПССІ та даними можна розглядати через авторство об'єкта. Об'єктами платформи є: миттєве повідомлення *Message* реакція на миттєве повідомлення *Reaction*

$$Object = \langle Message, Reaction \rangle \quad (33)$$

Один і той самий об'єкт може відображатися на сторінці декількох акторів. Найчастіше автор об'єкта зберігає його у себе на сторінці, а інші його поширюють. Тобто у інших акторів є тільки посилання на оригінал.

$$Object(Reference) = \left\langle \begin{matrix} Object(Parent Reference), \dots \\ Object(\dots Object(Actor)) \end{matrix} \right\rangle, \quad (34)$$

де *Object(Reference)*, поширений об'єкт, *Object(Actor)* оригінальний (непоширений) об'єкт.

Платформа ССІ задає типи даних, а наповненням цих даних займаються самі актори. На платформі користувач може виконувати $Action = \{1 \dots M\}$ допустимих дій. Кожен актор платформи може зв'язатися із $n-1$ актором.

Характерною особливістю платформ є їхня децентралізація та графоподібна структура зв'язків між суб'єктами.

Висновки.

У роботі було побудовано модель соціального середовища Інтернету. Досліджено основні та додаткові вузли ПССІ, виділено основні регіони ПССІ. У кожного регіону є своє призначення та функціонал. Одні регіони дають змогу налаштувати загальний вигляд сторінки користувача (регіон налаштувань), інші – з'єднувати сторінку користувача з іншими сторінками (регіон зв'язків), інші дають змогу публікувати і ділитися дописами.

Основними вузлами сторінки користувача соціального середовища Інтернету, які формують його профіль, є: особиста інформація користувача, список друзів та спільнот, список дописів, перелік мультимедійних даних користувача, список дій над дописами користувача, інша інформація. Розроблені моделі у подальшому ляжуть в основу ідентифікації та аналізу вузлів ПССІ. Також модель соціального середовища Інтернету є основою для розробки алгоритмів аналізу сторінки користувача ПССІ.

Список літератури:

1. Rezvanian, Alireza, Meybodi, Mohammad Reza. Stochastic graph as a model for social networks. *Computers in Human Behavior*, 2016, 64: 621–640.
2. De Nooy Wouter, Mrvar Andrej, Batagelj Vladimir. *Exploratory social network analysis with Pajek*. Cambridge University Press, 2018.
3. He Zaobo, Cai Zhipeng, Wang, Xiaoming. Modeling propagation dynamics and developing optimized countermeasures for rumor spreading in online social networks. In: *Distributed Computing Systems (ICDCS), 2015 IEEE 35th International Conference on*. IEEE, 2015. p. 205–214.
4. Mazurenko V.V., Stova S.D. Review of models of analysis of social networks. 2015.
5. Fedushko S., Biluschak H., Syerov Yu. Statistical Methods of Virtual Community Users Age Verification. *International Journal of Mathematics and Computational Science*. Vol. 1, No. 3, 2015. P. 174–182.
6. Valles-Catala, Toni, et al. Multilayer stochastic block models reveal the multilayer structure of complex networks. *Physical Review X*, 2016, 6.1: 011036.
7. Пелешишин А., Трач О. Визначення елементів соціально орієнтованих ризиків при організації життєвого циклу віртуальної спільноти. *Безпека інформації*. 2017. Т.23, № 2. С. 130–135.
8. Trach O., Peleshchyn A. Development of directions tasks indicators of virtual community life cycle organization. *Proceedings of the XIth International Scientific and Technical Conference “Computer Sciences and Information Technologies” (CSIT-2017)*. Lviv, 05–08 September 2017. 2017. P. 127–130.
9. Mastykash O., et al. Internet Social Environmental Platforms Data Representation. In: *2018 IEEE 13th International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)*. IEEE, 2018. p. 199–202.

МОДЕЛЬ СОЦИАЛЬНОЙ СРЕДЫ ИНТЕРНЕТА

В статье разработана модель социальной среды Интернета, отмечено понятие платформы социальной среды Интернета. Было осуществлено разделение платформы на регионы, а именно: регион личной информации, регион личных сообщений, регион настроек, регионы связей между узлами, регионы сообщений, регион мультимедийных данных, дополнительные регионы. Определено понятие актера социальной среды Интернета, выделены его атрибуты и приведены правила организации связей между сущностями платформы.

Ключевые слова: виртуальное сообщество, социальная среда Интернета, модель программного обеспечения, регион социальной среды Интернета.

MODEL OF SOCIAL ENVIRONMENT OF THE INTERNET

The article develops the model of the social environment of the Internet, the notion of the platform of the social environment of the Internet is defined. The division of the platform into regions was carried out namely: the region of personal information, the region of private messages, the region of settings, the regions of links between nodes, the regions of the posts, the region of multimedia data, additional regions. The notion of the actor of the social environment of the Internet is indicated, his attributes are highlighted and the rules of organization of connections between the entities of the platform are given.

Key words: virtual community, social internet environment, software model, region of social Internet environment.

УДК 004.896

Муренко В.В.

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

Дьяков С.О.

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

CRM-СИСТЕМА ПРОДАЖУ ТА КУПІВЛІ РЕКЛАМНИХ ПОВІДОМЛЕНЬ У “TELEGRAM”

Технології миттєвих повідомлень та месенджерів стрімко розвиваються та стають невіддільною частиною життя людини. На ринку месенджерів доступно багато рішень, які тісно конкурують між собою, але один з них виділяється своєю простотою та функціональністю, це – “Telegram”. У статті буде розкрито суть однієї з проблем, яка виникає у користувачів під час придбання рекламних повідомлень у месенджері. Під час аналізу цієї проблеми буде виявлено, як можна її вирішити за допомогою створення спеціальної CRM-системи. Також буде розглянуто питання лояльності користувачів під час користування подібною системою. Загалом стаття має розкрити питання призначення звичайної CRM-системи та доцільність використання такої системи у процесі продажу та купівлі рекламних повідомлень у месенджері.

Ключові слова: CRM, купівля, продаж, реклама, месенджер, Telegram, система.

Постановка проблеми. Багато людей використовують “Telegram” на своїх портативних пристроях через зручний обмін миттєвими повідомленнями, однак цей додаток має й інші можливості. Зокрема, сюди можна віднести можливість створення приватних і публічних каналів, які можна використовувати по-різному.

Часто ці канали використовуються бізнесом для акумулювання постійної аудиторії, яка користується послугами або продуктом цього бізнесу. Багато відомих людей також створюють свої телеграм-канали з метою акумулювання бази своїх фанатів. Нерідко так стається, що інтереси аудиторії відомої людини можуть пересікатися з інтересами бізнесу.

Так, наприклад, продукт, який виготовляється бізнесом, може бути прорекламований у телеграм-каналі зірки. Звісно, що такі послуги не є безкоштовними. Через це виникає потреба в купівлі та продажу рекламних повідомлень (постів).

Із особистого досвіду можу сказати, що натеппер процес купівлі-продажу рекламних повідомлень не є зручним навіть для людини з досвідом. Так, у ньому ви можете натрапити на такі підводні камені, як: продаж за завищеною ціною, видалення рекламного повідомлення раніше за зазначений термін або повне небажання публікації повідомлення адміністратором каналу після отримання грошей. Звісно, можна знайти менеджера

або іншу людину, яка буде займатися закупкою реклами для вашого бізнесу вручну, але для вас – це додаткові витрати, які не завжди є правильним вкладенням коштів у розвиток власної справи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Виходячи із досліджень інтернет-порталу aip.ua [1], можна зробити висновки, що останнім часом з’явилися сотні авторських телеграм-каналів: на цьому позначилося збільшення аудиторії та підйом інтересу до месенджеру у нашій країні. Лідери українського сегменту телеграм-каналів можуть похизуватися десятками тисяч користувачів, однак монетизувати цю аудиторію наважуються лише деякі. Часто це пов’язано з тим, що адміністратори просто не знають, де саме можна знайти рекламодавця, а якщо і володіють такою інформацією, то не роблять цього через страх не отримати свої гроші.

Якщо брати до уваги дослідження російських колег, то можна зрозуміти, що у РФ аудиторія месенджеру сягає 15 млн осіб, а обсяг рекламного ринку оцінюють у 7 млн гривень [2].

Постановка завдання. CRM-система купівлі та продажу рекламних повідомлень у “Telegram” буде складатися з веб-додатка та API, що дасть змогу вирішити поставлену проблему. Головне завдання CRM-системи – організувати безпечну платформу для купівлі та продажу рекламних повідомлень.

Під час розробки веб-додатка буде розглянуто основні відомості про сучасні CRM-системи, виконано порівняння їх із використанням робочої сили, а також знайдено шляхи для вирішення проблем, які виникають у процесі купівлі та продажу рекламних повідомлень у ручному режимі.

Виклад основного матеріалу. CRM-система (Customer Relationship Management System) – це поняття, яке часто використовується бізнесом для управління взаєминами між компанією і клієнтами, які користуються її послугами або продуктом.

Така система часто може збирати, сортувати та аналізувати будь-яку інформацію про клієнта, яку вона отримує під час взаємодії з ним. Існують 3 основні принципи, які часто використовуються для створення таких систем:

- єдине сховище інформації, в якому можна знайти будь-яку інформацію про взаємодію з клієнтом;
- синхронізація управління каналами взаємодії;
- постійний аналіз зібраної про клієнта інформації та прийняття рішень залежно від неї.

Щодо підходів до роботи сучасні CRM-системи поділяються на такі: оперативні, співробітницькі та аналітичні.

Оперативні – автоматизація споживчих бізнес-процесів і допомога наявному персоналу у швидкому виконанні своїх функцій.

Співробітницькі – під час використання цього підходу CRM-система самостійно взаємодіє з користувачем без використання людини. У цьому разі будь-яка інформація, котра є результатом взаємодії, завжди залишається у системі і далі може бути використана у власних цілях бізнесу.

Аналітичні – доволі популярний на сьогодні метод роботи CRM-систем. У використанні цього підходу у систему нерідко завантажуються база даних з інформацією про клієнтів компанії, яка згодом сортується, аналізується з різноманітними цілями, які будуть корисними для бізнесу.

Розібравшись з визначенням та описом типової CRM-системи, у користувача може виникнути запитання: чи не легше замість розробки складної системи використовувати працю професіоналів, які, напевне, виконають ті ж самі операції значно продуктивніше. Тому варто розглянути основні переваги CRM-системи для бізнесу:

1. Оперативність обслуговування та проведення різних операцій;
2. Мультизадачність у роботі з потенційними клієнтами;
3. Відсутність помилок у роботі;

4. Зменшення витрат на заробітну плату (потрібно оплачувати тільки тих спеціалістів, котрі будуть слідкувати за роботою системи);

5. Безперервна робота та доступ 24/7.

Як бачимо, використання такої системи не тільки підвищує швидкість роботи з потенційними клієнтами, але і дає змогу уникнути помилок, що у свій час підвищує лояльність користувачів.

Як відомо, для підвищення лояльності клієнтів від організації також вимагається постійне спілкування та взаємодія з ними. Під час таких взаємодій людина, котра спілкується з клієнтом, має можливість вивчити та визначити всі індивідуальні потреби щодо товару або послуги.

У нашому разі CRM-система буде надавати послуги купівлі та продажу і на перший погляд може здаватися, що без втручання людини досягти лояльності клієнтів неможливо, але це не так. Справа в тому, що у подібних системах на лояльність користувача часто впливає досконалість системи в її технічних аспектах [3], тобто не обов'язково потрібне постійне спілкування з клієнтом, досить реалізувати систему так, щоб вона:

а) могла виконувати абсолютно всі функції, які можуть знадобитися користувачу;

б) мала інтуїтивно зрозумілий інтерфейс та містила підказки;

в) пропонувала клієнту зробити той чи інший вибір (наприклад, обрати канал для купівлі реклами) на основі аналізу його дій у системі.

Розібравшись із загальним поняттям та основними перевагами сучасних CRM-систем, визначимо призначення конкретно цієї системи та її основні принципи.

Призначення системи продажу та купівлі рекламних повідомлень у “Telegram” полягає у створенні та розвитку середовища, яке б задовольняло всі потреби клієнтів, котрі виступають як покупцями, так і продавцями рекламних повідомлень у телеграм-каналах.

Основні принципи розроблюваної системи:

- зручність у використанні;
- висока швидкодія;
- захищеність статистики та інформації системи;
- безпечна взаємодія з платіжними системами;
- вирішення проблем, які часто трапляються під час закупівлі реклами у ручному режимі;
- наявність якісної аналітики для користувача;
- відкритість розробки та звітування перед потенційними користувачами.

Як було сказано у розділі постановки задачі, подібна CRM-система має не тільки давати мож-

← Ноябрь 2018 →						
Пн	Вт	Ср	Чт	Пт	Сб	Вс
			1	2	3	4
5	6	7	8	9	10	11
12	13	14	15	16	17	18
19	20	21	22	23	24	25
26	27	28	29	30		

Рис. 1. Графік публікації у CRM-системі

ливість купувати та продавати рекламні повідомлення (бути біржею), але й вирішувати одну з описаних проблем, котрі виникають у роботі з рекламою у ручному режимі.

Зокрема, йдеться про видалення рекламного повідомлення (посту) адміністратором каналу раніше зазначеного часу або про повне небажання з боку адміністрації публікувати замовлене рекламне повідомлення. Часто трапляється так, що менеджери домовляються між собою про купівлю та публікацію повідомлення, але коли наближається термін публікації, то воно просто не з'являється в обраному каналі, а менеджер, котрий відповідав за продаж, взагалі пропадає.

І тут постає головне запитання цієї статті: «Як вирішити описану проблему?» Один із виходів – розробка спеціалізованої CRM-системи з графіком публікацій, яка допоможе власникам бізнесу і дасть їм можливість зекономити не тільки свої гроші, але і нерви.

Під графіком публікацій розуміється таблиця, яка за своїм характером схожа на звичайний календар і містить декілька (3) місць для публікації рекламного повідомлення у заданий час.

Наявність такого графіка, а також спеціально розробленого телеграм-боту, який би слідував

за публікацією і видаленням рекламного повідомлення в обраному каналі, дала б змогу власникам бізнесу без вагань просувати свої товари або послуги у месенджері, а власникам каналів – гарантовано отримувати гроші за рекламні місяці.

Висновки. Якщо говорити про спектр проблем, які виникають між користувачами під час ручної роботи з рекламою у месенджері “Telegram”, то їх можна перераховувати нескінченно, але з упевненістю можна зазначити, що використання CRM-підходу та створення спеціалізованої системи зможе на 90% вирішити всі ці питання та задовольнити користувача.

Створення подібної системи зможе популяризувати ринок реклами месенджеру в Україні загалом. Відсутність підводних каменів дасть змогу користувачам швидко знаходити, оплачувати та публікувати рекламні повідомлення без втручання сторонніх осіб.

Загалом, якщо говорити про ринок CRM-систем, то варто звернути увагу на те, що їх використання значно спростило роботу бізнесу у багатьох сферах. Такі системи використовуються повсюдно навіть через те, що деякі з них можуть повністю замінити ручну працю людини.

Список літератури:

1. Сапитонов М. Сколько стоит реклама в украинских Telegram-каналах. Дата оновлення: 11.12.2017. URL: <https://ain.ua/2017/12/11/reklama-v-ukr-kanalax/> (дата звернення: 12.11.2018).
2. Стогней А. Рынок рекламы в Telegram после блокировки сократится на треть. Дата оновлення: 13.04.2018. URL: <https://thebell.io/gynok-reklamy-v-telegram-posle-blokirovki-sokratitsya-na-tret/> (дата звернення: 11.11.2018).
3. “Management Study Guide”. Increasing Customer Loyalty. URL: <https://www.managementstudyguide.com/increasing-customer-loyalty.htm> (дата звернення: 11.11.2018).
4. Раянов Р. Как создать собственную CRM. 2015. 10 с.

CRM-СИСТЕМА ПРОДАЖИ И ПОКУПКИ РЕКЛАМНЫХ СООБЩЕНИЙ В “TELEGRAM”

Технологии мгновенных сообщений та мессенджеров стремительно развиваются и становятся неотъемлемой частью жизни человека. На рынке мессенджеров доступно много решений, которые тесно конкурируют между собой, но одно из них выделяется своей простотой и функциональностью, это – “Telegram”. В статье будет раскрыта суть одной из проблем, которая возникает у пользователей во время покупки рекламных сообщений в мессенджере. Во время анализа этой проблемы будет указано, как можно решить ее с помощью использования специальной CRM-системы. Также будет рассмотрен вопрос лояльности пользователей во время пользования подобной системой. В общем статья должна раскрыть вопрос назначения обычной CRM-системы и целесообразность использования такой системы в процессе продажи и покупки рекламных сообщений в мессенджере.

Ключевые слова: CRM, купля, продажа, реклама, мессенджер, Telegram, система.

CRM SYSTEM OF SALE AND PURCHASE OF ADVERTISING MESSAGES IN “TELEGRAM”

Instant messaging technologies and instant messengers are rapidly developing and become an integral part of human life. There are many solutions available on the instant messenger market, which are in close competition with each other, but one of them stands out for its simplicity and functionality, this is “Telegram”. The article will reveal the essence of one of the problems that happens when users purchase advertising messages in the messenger. During the analysis of this problem, it will be indicated how to solve it using a special CRM system. The issue of user loyalty during the use of such a system will also be considered. In general, the article should disclose the question of the appointment of a CRM system and the appropriateness of using such a system in the process of selling and buying advertising messages in the messenger.

Key words: CRM, buying, selling, advertising, messenger, Telegram, system.

Павленко В.Д.

Одеський національний політехнічний університет

Ломовий В.І.

Національний університет «Одеська морська академія»

ПОБУДОВА АПРОКСИМАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ НЕЛІНІЙНОЇ ДИНАМІЧНОЇ СИСТЕМИ У ВИГЛЯДІ ПОЛІНОМА ВОЛЬТЕРРА

Пропонується метод побудови апроксимаційної моделі Вольтерра нелінійної динамічної системи в часовій області з використанням поліімпульсних тестових сигналів різних амплітуд. Метод заснований на використанні регуляризованого методу найменших квадратів і виборі оптимальної величини кроку по амплітуді тестових сигналів, що забезпечує підвищення точності та обчислювальної стійкості процедури ідентифікації.

Ключові слова: нелінійні динамічні системи, поліноми Вольтерра, ядра Вольтерра, ідентифікація, регуляризація.

Постановка проблеми. Методи математичного моделювання та експеримент є основними засобами дослідження складних нелінійних динамічних систем (далі – НДС). Для опису НДС, які розглядаються як «чорний ящик», часто використовуються моделі Вольтерра (МВ) [1; 2]. При цьому нелінійні та динамічні властивості системи повністю характеризуються послідовністю багатовимірних вагових функцій – ядер Вольтерра (далі – ЯВ). Задача ідентифікації у вигляді МВ полягає у визначенні ЯВ на основі даних вимірювань «вхід–вихід» НДС [2].

Однак наявні натеper прикладні алгоритми ідентифікації НДС на основі МВ все ще не дають змогу повною мірою використовувати можливості цього математичного апарата. Це зумовлено цілою низкою причин, найбільш важливими з яких є: недовраховання істотного впливу похибок вимірювань на результат ідентифікації в алгоритмах експериментального визначення ЯВ (що обмежує їх застосування в реальних умовах), а також недостатній рівень розробки програмно-алгоритмічного забезпечення задач ідентифікації НДС на основі МВ.

Удосконалення методів та інструментальних засобів ідентифікації неперервних НДС на основі МВ, призначених для дослідження об'єктів різної фізичної природи, є актуальною науково-технічною задачею.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для побудови МВ НДС необхідно вирішити завдання виділення із сумарного відгуку $y(t)$ парціального складника (ПС) n -го порядку та визначення з нього відповідних ЯВ. У [3] пропонується метод виділення

ПС за допомогою n -разового диференціювання відгуків НДС по параметру – амплітуді тестових сигналів. При цьому пропонується використовувати тестові сигнали – нерегулярні послідовності імпульсів (поліімпульсні сигнали). У роботах [3; 4] розроблено обчислювальні методи оцінки багатовимірних ЯВ (їх діагональні та піддіагональні перетини), що базуються на чисельному диференціюванні реакцій НДС по амплітуді тестових сигналів.

Область застосування МВ у вигляді інтегродіференціальних рядів обмежена слабо нелінійним режимом функціонування, тобто роботою НДС за малих амплітуд вхідних сигналів або малої нелінійності. Для опису істотно нелінійної системи застосовують інтегродіференціальні поліноми Вольтерра [5; 6]. Доказана М. Фреше теорема [7] обґрунтовує принципову можливість такої апроксимації. Однак теорема не вказує на конструктивні алгоритми побудови поліномів Вольтерра за даними експериментів «вхід–вихід».

Метою цієї роботи є теоретичне обґрунтування та дослідження методу побудови апроксимаційної МВ у вигляді полінома Вольтерра за допомогою тестових поліімпульсних сигналів.

На результати ідентифікації НДС на основі апроксимаційної МВ у вигляді поліномів Вольтерра за використання тестових поліімпульсних сигналів істотний вплив чинять похибки вимірювань. Для підвищення обчислювальної стійкості алгоритмів ідентифікації в роботі застосовуються процедури шумоподавлення, засновані на вейвлет-перетворенні [8; 9].

Постановка завдання. Співвідношення «вхід–вихід» для неперервної НДС з одним вхо-

дом і одним виходом може бути представлено рядом Вольєрра (РВ):

$$\begin{aligned}
 y(t) &= w_0(t) + \int_0^t w_1(\tau)x(t-\tau)d\tau + \\
 &+ \int_0^t \int_0^t w_2(\tau_1, \tau_2)x(t-\tau_1)x(t-\tau_2)d\tau_1 d\tau_2 + \\
 &+ \int_0^t \int_0^t \int_0^t w_3(\tau_1, \tau_2, \tau_3)x(t-\tau_1)x(t-\tau_2)x(t-\tau_3)d\tau_1 d\tau_2 d\tau_3 + \dots = \\
 &= w_0(t) + \sum_{n=1}^{\infty} y_n(t),
 \end{aligned} \tag{1}$$

де $x(t)$ і $y(t)$ – вхідний і вихідний сигнали системи відповідно; $w_n(\tau_1, \dots, \tau_n)$ – вагова функція або ядро Вольєрра n -го порядку ($n=1,2,3,\dots$), симетрична щодо дійсних змінних τ_1, \dots, τ_n функція; $y_n(t)$ – парціальний складник (ПС) відгуку системи (n -вимірний інтеграл згортки); $w_0(t)$ – вільний член РВ (за нульових початкових умов $w_0(t) \equiv 0$); t – поточний час.

На практиці РВ замінують поліномом і зазвичай обмежуються кількома першими членами ряду. Побудова моделі НДС у вигляді РВ полягає у виборі виду тестових впливів $x(t)$ і розробці алгоритму, який дав би змогу за виміряними реакціями $y(t)$ виділяти ПС $y_n(t)$ і визначати на їх основі ЯВ $w_n(\tau_1, \dots, \tau_n)$, $n=1,2,\dots$ для моделювання системи у часовій області.

Ідентифікація, за своєю суттю, належить до обернених задач, у розв'язанні яких виникають труднощі обчислювального плану, зумовлені некоректністю постановки задачі. Одержувані розв'язки виявляються нестійкими до похибок вхідних даних – вимірювань відгуків НДС, що ідентифікується. У разі використання МВ необхідно також розв'язати задачу поділу відгуку $y(t)$ досліджуваної НДС на ПС $y_n(t)$, що відповідають окремим членам РВ, оскільки вимірюється сумарний відгук $y(t)$ на тестовий сигнал $x(t)$.

Метод ідентифікації НДС на основі апроксимаційної МВ. Пропонується метод побудови апроксимаційної МВ НДС. Метод ідентифікації НДС ґрунтується на апроксимації відгуку НДС $y(t)$ на довільний детермінований сигнал $x(t)$ у вигляді інтегростепеневого полінома N -го порядку (N – порядок апроксимаційної моделі):

$$\hat{y}_N(t) = \sum_{n=1}^N \hat{y}_n(t) = \sum_{n=1}^N \int_0^t \dots \int_0^t w_n(\tau_1, \dots, \tau_n) \prod_{i=1}^n x(t-\tau_i) d\tau_i. \tag{2}$$

Нехай на вхід НДС по черзі подаються тестові сигнали $a_1x(t), a_2x(t), \dots, a_Lx(t)$, де a_1, a_2, \dots, a_L – різні дійсні числа, що задовольняють умові $0 < |\alpha_j| \leq 1$ для $\forall j=1,2,\dots,L$, тоді

$$\begin{aligned}
 \hat{y}_N[a_jx(t)] &= \sum_{n=1}^N \hat{y}_n[a_jx(t)] = \\
 \sum_{n=1}^N a_j^n \int_0^t \dots \int_0^t w_n(\tau_1, \dots, \tau_n) \prod_{i=1}^n x(t-\tau_i) d\tau_i &= \sum_{n=1}^N \hat{y}_n(t) a_j^n.
 \end{aligned} \tag{3}$$

ПС в апроксимаційній моделі визначаються за допомогою методу найменших квадратів (МНК), який дає змогу отримати такі їх оцінки, за яких сума квадратів відхилень відгуків НДС, що ідентифікується, від відгуків моделі мінімальна, тобто забезпечує мінімум середньоквадратичного критерію:

$$\begin{aligned}
 J_N &= \sum_{j=1}^L (y[a_jx(t)] - \hat{y}_N[a_jx(t)])^2 = \\
 &= \sum_{j=1}^L \left(y_j(t) - \sum_{n=1}^N a_j^n \hat{y}_n(t) \right)^2 \rightarrow \min,
 \end{aligned} \tag{4}$$

де $y_j(t) = y[a_jx(t)]$. Мінімізація критерію (4) зводиться до розв'язання системи нормальних рівнянь Гаусса, яку у векторно-матричній формі можна записати у вигляді:

$$A'A\hat{y} = A'y, \tag{5}$$

де A' – транспонована матриця;

$$A = \begin{bmatrix} a_1 & a_1^2 & \dots & a_1^N \\ a_2 & a_2^2 & \dots & a_2^N \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_L & a_L^2 & \dots & a_L^N \end{bmatrix}, \quad y = \begin{bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \\ \dots \\ y_L(t) \end{bmatrix}, \quad \hat{y} = \begin{bmatrix} \hat{y}_1(t) \\ \hat{y}_2(t) \\ \dots \\ \hat{y}_N(t) \end{bmatrix}.$$

З рівняння (5) отримуємо

$$\hat{y} = (A'A)^{-1}A'y. \tag{6}$$

Застосування тестових поліімпульсних сигналів. Якщо тестовий сигнал $x(t)$ являє собою одиничний імпульс (функцію Дірака) з вагою s , то розв'язком СЛАР (6) є ЯВ першого порядку $\hat{w}_1(t)$ і діагональні перетини ЯВ n -го порядку. Оскільки при $x(t) = s\delta(t)$

$$\begin{aligned}
 \hat{y}_n(t) &= \int_0^t \dots \int_0^t \hat{w}_n(\tau_1, \dots, \tau_n) \prod_{i=1}^n s\delta(t-\tau_i) d\tau_i = \\
 &= s^n \hat{w}_n(t, \dots, t),
 \end{aligned} \tag{7}$$

то

$$\hat{w}_n(t, \dots, t) = \frac{\hat{y}_n(t)}{s^n}. \tag{8}$$

Пропонується метод визначення піддіагональних перетинів ЯВ n -го порядку ($2 \leq n \leq N$) НДС, формалізм якого ґрунтується на такому твердженні.

Твердження. Нехай тестові впливи являють собою суму n імпульсних сигналів зі зсувом за часом t на τ_1, \dots, τ_n , тоді оцінка піддіагонального перетину ЯВ n -го порядку:

$$\begin{aligned}
 \hat{w}_n(t - \tau_1, \dots, t - \tau_n) &= \\
 \frac{1}{n!s^n} \sum_{\xi_{\tau_1}, \dots, \xi_{\tau_n}=0}^1 (-1)^{n+\sum_{i=1}^n \xi_{\tau_i}} \hat{y}(t, \xi_{\tau_1}, \dots, \xi_{\tau_n}), & \tag{9}
 \end{aligned}$$

де $\hat{y}(t, \xi_{\tau_1}, \dots, \xi_{\tau_n})$ – оцінка n -ої ПС відгуку НДС у момент часу t , яку отримано в результаті обробки даних експериментів на основі (6) за дії на вході системи поліімпульсного сигналу

з вагою s , причому якщо $\xi_{\tau_i} = 1$, то тестовий вплив містить імпульсний сигнал зі зсувом на τ_i , в іншому випадку при $\xi_{\tau_i} = 0$ – не містить [4].

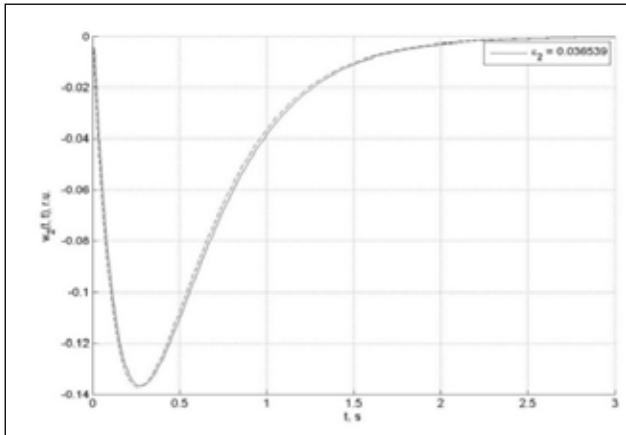


Рис. 1. Оцінка діагонального перетину ЯВ 2-го порядку тестової НДС у точних вимірах і еталонна функція (пунктиром)

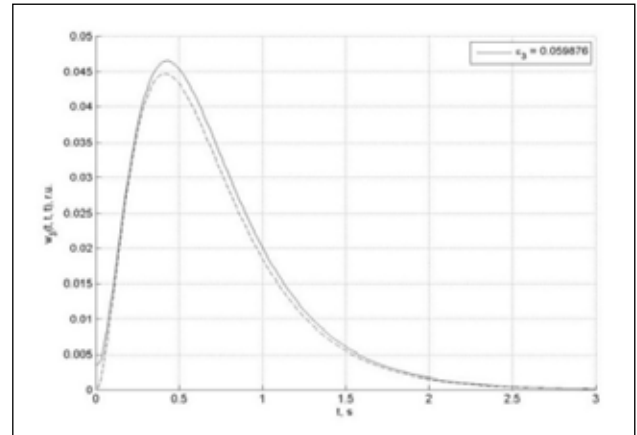
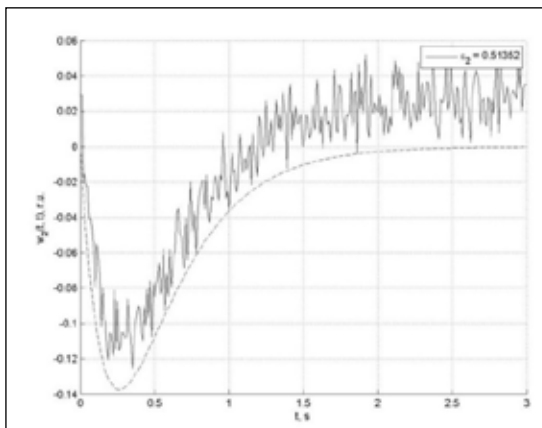
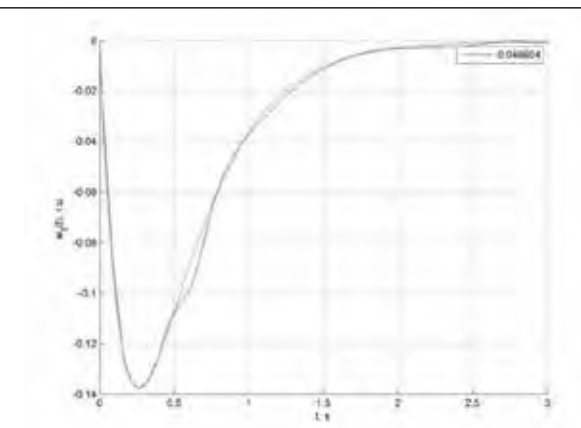


Рис. 2. Оцінка діагонального перетину ЯВ 3-го порядку тестової НДС у точних вимірах і еталонна функція (пунктиром)

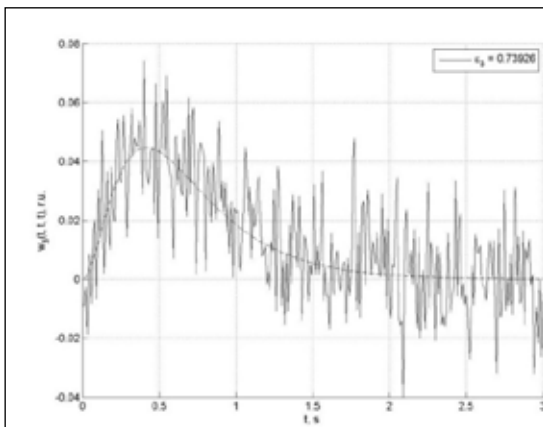


а

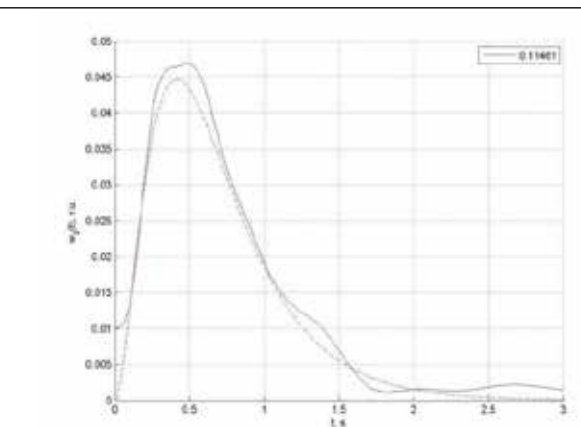


б

Рис. 3. Оцінки діагонального перетину ЯВ 2-го порядку тестової НДС за похибок вимірювань 5% і еталонна функція (пунктиром): а) без регуляризації; б) після регуляризації і вейвлет-фільтрації



а



б

Рис. 4. Оцінки діагонального перетину ЯВ 3-го порядку тестової НДС за похибок вимірювань 1% і еталонна функція (пунктиром): а) без регуляризації; б) після регуляризації і вейвлет-фільтрації

Таким чином, обчислювальний алгоритм, що реалізує метод ідентифікації багатовимірних ЯВ на основі співвідношення (9), зводиться до розв'язання СЛАР (6) для кожного фіксованого моменту часу t на інтервалі $[0, T]$, де T – час моделювання.

Регуляризація процедури ідентифікації на основі МНК. Система нормальних рівнянь Гаусса (6) дає хороші результати апроксимації функцій, якщо число вимірювань L досить велике (багато більше, ніж ступінь апроксимуючого полінома N) або помилки вимірювань малі. В іншому разі визначник системи виявляється близьким до нуля і система стає погано обумовленою. При цьому можливі великі похибки в оцінці параметрів апроксимуючого полінома.

Для отримання стійкого до похибок вимірювань розв'язку СЛАР (6) використовується метод регуляризації А.М. Тихонова [10], заснований на варіаційному способі побудови регуляризуючого оператора. Цей метод зводиться до визначення наближеного вектора розв'язку, що мінімізує деякий згладжувальний функціонал. Єдиний вектор, що задовольняє умові мінімуму згладжувального функціоналу, визначається на підставі розв'язку СЛАР:

$$(A'A + \alpha I)\hat{y}_\alpha = A'y, \quad (10)$$

де I – одинична матриця; α – параметр регуляризації Тихонова.

Наближений розв'язок, який одержано на основі (10), відповідає нульовому порядку регуляризації [10]. Для підвищення гладкості розв'язку

використовується регуляризаційна матриця R і знаходиться розв'язок СЛАР:

$$(A'A + \alpha R)\hat{y}_\alpha = A'y \quad (11)$$

у вибраному значенні параметра α . Регуляризаційна матриця R має стрічкову структуру, діагональні елементи якої дорівнюють: $r_{pp} = 1 - (\Delta a)^{-2}$, а елементи над- і піддіагоналей дорівнюють: $r_{pq} = -(\Delta a)^{-2}$, $p \neq q$; $p, q = \overline{1, L}$; $\Delta a = a_L / L$.

У реалізації цього алгоритму параметр регуляризації α вибирають досить малим (з аналізу наявної інформації про похибки вхідних даних і похибки обчислень). У роботі відповідне значення параметра регуляризації α визначається шляхом підбору, тобто багаторазовими обчисленнями \hat{y}_α для різних значень α . Квазіоптимальне значення $\alpha = \alpha_0$ вибирається з умови:

$$\|\hat{y}_{\alpha_{i+1}} - \hat{y}_\alpha\| \rightarrow \min, \quad (12)$$

де $\alpha_{i+1} = \mu\alpha_i$, $0 < \mu < 1$, $i = 0, 1, 2, \dots$. Необхідно відзначити, що різні способи визначення параметра регуляризації можуть дати різні результати, як наслідок, відрізняються один від одного регуляризовані розв'язки.

Аналіз точності та обчислювальної стійкості методу ідентифікації. За допомогою засобів комп'ютерного моделювання виконано дослідження точності та обчислювальної стійкості методу ідентифікації. Числові експерименти проводилися за допомогою імітаційного моделювання в середовищі Matlab-Simulink. Критерієм якості ідентифікації (адекватності моделі) є нормована середньоквадратична похибка (НСКП) оцінки ЯВ за різних рівнів похибок вимірювань відгуків НДС:

Таблиця 1

НСКП оцінки ядер Вольєрра n -го порядку за поліімпульсних сигналів для різної похибки (σ) вимірювань відгуків тестового об'єкта і різних параметрів алгоритму ідентифікації з регуляризацією 0-го порядку (R_0) і за використання вейвлет-фільтрації (W)

Параметри алгоритму			Похибки вимірювань, σ %						
Δa	L	n	0	1	3	5			
			R_0	R_0	W	R_0	W	R_0	W
4	50	1	0,0083	0,0084	0,0084	0,0092	0,0089	0,0099	0,0085
		2	0,1141	0,1078	0,1078	0,0982	0,0979	0,0924	0,0927
		3	0,2226	0,2231	0,2222	0,2299	0,2226	0,2401	0,2226
10	20	1	0,0082	0,0084	0,0082	0,0099	0,008	0,0131	0,0096
		2	0,1212	0,1208	0,1207	0,1225	0,1219	0,1239	0,1223
		3	0,2364	0,2389	0,2365	0,2625	0,2393	0,3158	0,2665
20	10	1	0,0082	0,0097	0,0086	0,0181	0,0105	0,0277	0,0163
		2	0,1317	0,1322	0,1318	0,1335	0,1303	0,1456	0,13
		3	0,2522	0,2623	0,2452	0,3514	0,2393	0,525	0,3042
10	10	1	0,0089	0,0103	0,0091	0,0188	0,0125	0,0281	0,0141
		2	0,0365	0,0422	0,036	0,0786	0,0405	0,1236	0,0466
		3	0,0599	0,3887	0,1146	1,1185	0,3721	1,7448	0,5068

$$\varepsilon_n = \sqrt{\frac{\sum_{l=1}^m (w_{nl} - \hat{w}_{nl})^2}{\sum_{l=1}^m w_{nl}^2}}, \quad (13)$$

де m – кількість відліків на інтервалі часу спостереження; w_{nl} , \hat{w}_{nl} – еталонні значення й оцінки ЯВ n -го порядку, отримані в результаті обробки експериментальних даних (відгуків системи) у дискретні моменти часу t_l відповідно.

Для підвищення обчислювальної стійкості методу ідентифікації застосовуються процедури шумозаглушення (згладжування) до одержуваних оцінок ЯВ, що базуються на вейвлет-перетворенні [9].

Шумозаглушення досягається видаленням високочастотних складників зі спектра сигналу, що являє собою адитивну суміш інформаційного складника – ЯВ, яку одержано в результаті обробки відгуків і шуму, зумовленого похибкою вимірювальної апаратури. Стосовно вейвлетного розкладання це реалізується безпосередньо видаленням деталізуючих коефіцієнтів високочастотних рівнів. Задаючи певний поріг для їх рівня, зрізуючи по ньому деталізуючі коефіцієнти, зменшується рівень шумів.

Для згладжування результатів ідентифікації використовується утиліта `wden` з пакета розширення Wavelet Toolbox системи Matlab з материнським вейвлетом `coiflet – coif4` за таких значень параметрів: параметр встановлення правила обчислення порогового значення для обмеження коефіцієнтів розкладання `TPTR='minimaxi'` (мінімаксного оцінювання); параметр установки типу порогу очищення `SORH='s'` (гнучкий); параметр, який визначає спосіб перерахунку порогу `SCAL='one'` (використання порога, єдиного для всіх рівнів розкладання, без перемасштабування); глибина розкладання даних – 3.

У дослідженнях модель одержуваної зашумленої оцінки діагонального перетину ЯВ приймається адитивною $w_n(t, \dots, t) + \zeta(t)$: з рівномірним кроком по аргументу t , де $w_n(t, \dots, t)$ – корисний інформаційний складник, $\zeta(t)$ – перешкода (білий гауссівський шум з дисперсією σ^2 і нульовим середнім значенням).

У табл. 1 наведено значення НСКП ідентифікації тестової НДС у вигляді апроксимаційної МВ третього порядку з використанням тестових

імпульсів різної полярності за різних рівнів похибок вимірювань (1%, 3%, 5%) та застосування регуляризації 0-го порядку (10).

Результати ідентифікації тестової НДС з використанням імпульсних сигналів ($\Delta a=10$, $L=10$) і застосуванням регуляризованого МНК у точних вимірах відгуків – оцінки ЯВ $\hat{w}_2(t, t)$, $\hat{w}_3(t, t)$ представлено на рис. 1 і рис. 2 відповідно. На рис. 3 і рис. 4 наведено оцінки діагональних перетинів ЯВ другого і третього порядків тестової НДС без регуляризації (а) та після регуляризації і вейвлет-фільтрації (згладжування) (б) за похибок вимірювань відгуків 5 і 1% відповідно.

За похибок вимірювань $\sigma=5\%$ ($\Delta a=10$, $L=10$) у результаті ідентифікації виникають похибки в оцінках ЯВ – похибка оцінки збільшується порівняно з результатом ідентифікації у точних вимірах більш ніж у 6, 14 і 11 разів для $n=1, 2$ і 3 відповідно. Точність оцінювання ЯВ за рахунок застосування регуляризації 0-го порядку підвищується в 2–4 рази. Застосування вейвлет-перетворення до оцінок ЯВ, які отримано за допомогою регуляризованого алгоритму ідентифікації, підвищує точність ідентифікації в 2–3,4 рази. Похибки ідентифікації за рахунок послідовного застосування процедури регуляризації та вейвлет-перетворення зменшуються в 4–7,4 рази.

Висновки. Отримав розвиток метод побудови апроксимаційної МВ НДС у часовій області з використанням поліімпульсних тестових сигналів. На результати ідентифікації апроксимаційної МВ істотно впливають похибки вимірювань. Для тестової НДС засобами імітаційного моделювання в середовищі Matlab-Simulink виконані дослідження точності і завадостійкості одержуваних оцінок ЯВ першого, другого і третього порядків. Прийнятні на практиці точність і обчислювальна стійкість досягаються застосуванням методу регуляризації некоректних задач за А.М. Тихоновим. Застосування регуляризації дає змогу в 2–4 рази підвищити точність і обчислювальну стійкість процедури ідентифікації. Для підвищення обчислювальної стійкості алгоритмів побудови апроксимаційної МВ застосовуються процедури шумозаглушення до отримуваних оцінок багатовимірних ЯВ, що засновані на вейвлет-перетворенні. Це підвищує точність у 2–3,4 рази і забезпечує гладкість результатів ідентифікації.

Список літератури:

1. Doyle F.J., Pearson R.K., Ogunaikie D.A. Identification and Control Using Volterra Models. Published Springer Technology & Industrial Arts, 2001. 314 p.

2. Giannakis G.B., Serpedin E.A. A bibliography on nonlinear system identification and its applications in signal processing, communications and biomedical engineering. Signal Processing. 2001. Vol. 81. Issue 3. P. 533–580. DOI: 10.1016/s0165-1684(00)00231-0
3. Павленко В.Д. Идентификация нелинейных динамических систем в виде ядер Вольтерры на основе данных измерений импульсных откликов. Электронное моделирование. 2010. Т. 32. № 3. С. 3–18.
4. Павленко В.Д., Павленко С.В. Методы детерминированной идентификации нелинейных систем в виде моделей Вольтерра. Труды XII Всероссийского совещания по проблемам управления ВСПУ-2014. Москва, 16–19 июня 2014 г. М.: Ин-т проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2014. С. 2830–2841.
5. Данилов Л.В., Соловьева Е.Б. Макромоделирование существенно нелинейных электрических цепей на основе функциональных полиномов. Известия вузов. Радиоэлектроника. 1990. № 6. С. 3–7.
6. Золотницкий В.М., Соловьева Е.Б. К решению задачи идентификации модели в виде полинома Вольтерра. Известия ЛЭТИ. Л.: ЛЭТИ, 1990. Вып. 424. С. 15–19.
7. Леви П. Конкретные проблемы функционального анализа. / Пер. с франц. под ред. Г.Е. Шилова. М.: Наука, 1967. 511 с.
8. Смоленцев Н. К. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в MATLAB. М.: ДМК Пресс, 2005. 304 с.
9. Павленко С.В. Применение вейвлет-фильтрации в процедуре идентификации нелинейных систем на основе моделей Вольтерра. Восточно-европейский журнал передовых технологий. 2010. № 6/4 (48). С. 65–70.
10. Тихонов А.Н., Гончарский А.В., Степанов В.В., Ягола А.Г. Численные методы решения некорректных задач. М.: 1990. 230 с.
11. Pavlenko, V.D. Computing of the Volterra Kernels of a Nonlinear System Using Impulse Response Data / V.D. Pavlenko, M.M. Massri, V.M. Ilyin. Proc. of 9th International Middle Eastern Simulation Multiconference MEMS'2008, August 26–28, 2008, Philadelphia University, Amman, Jordan. P. 131–138.

ПОСТРОЕНИЕ АППРОКСИМАЦИОННОЙ МОДЕЛИ НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ В ВИДЕ ПОЛИНОМА ВОЛЬТЕРРА

Предлагается метод построения аппроксимационной модели Вольтерра нелинейной динамической системы во временной области с использованием полиимпульсных тестовых сигналов разных амплитуд. Метод основан на применении регуляризованного метода наименьших квадратов и выборе оптимальной величины шага по амплитуде тестовых сигналов, что обеспечивает повышение точности и вычислительной устойчивости процедуры идентификации.

Ключевые слова: нелинейные динамические системы, полиномы Вольтерра, ядра Вольтерра, идентификация, регуляризация.

CONSTRUCTION OF THE MODEL OF APPROXIMATION NONLINEAR DYNAMIC SYSTEM IN THE FORM VOLTERRA POLYNOMIAL

A method is proposed for constructing the Volterra approximating model of a nonlinear dynamical system in the time domain using polyimpulse test signals of different amplitudes. The method is based on the application of the regularized least squares method and the choice of the optimal step size for the amplitude of the test signals, which increases the accuracy and computational stability of the identification procedure.

Key words: nonlinear dynamical systems, Volterra polynomials, Volterra kernels, identification, regularization.

Пасєка М.С.

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ ХМАРНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ДЛЯ РОЗРОБКИ ПРОГРАМНИХ ДОДАТКІВ

У статті розглянуто теоретичні та практичні засади створення програмних додатків як складників великих інформаційних систем із використанням хмарних технологій, які забезпечують прискорення розробки та мінімізацію фінансових витрат на програмний проект. Проаналізовано наукові публікації в розрізі надання та використання хмарних технологій. Акцентовано на таких основних напрямках досліджень, як системний аналіз та класифікація сучасного стану інформаційних технологій в області використання хмарних ресурсів, вивчення відомих хмарних схем розподілу ресурсів на основі розроблених характеристик електронної тематичної таксономії, аналіз наукової літератури, у якій викладено інформацію щодо оптимізації розробки схем розподілу хмарних ресурсів.

Ключові слова: програмний додаток, хмарна технологія, інноваційна модель, системний аналіз, бізнес-логіка.

Постановка проблем. Хмарні технології з'явилися як популярна обчислювальна модель для опрацювання даних і реалізації обчислювальних інтенсивних програм за принципом «плати лише за те, що використав» (pay-as-you-go). Через усе більший попит на хмарні додатки стає вкрай важко ефективно розподіляти обчислювальні ресурси відповідно до потреб користувачів, одночасно дотримуватись балансу обслуговування між постачальниками послуг та різноманітними споживачами. Крім того, неоднорідність ресурсів у хмарі та непередбачуваність навантаження у ній і різноманітні цілі дійових осіб за її використання у геометричній прогресії ускладнюють розподіл та нормування навантаження у середовищі хмарних обчислень. Отже, як промисловість, так і наукові організації почали докладати значних зусиль до вивчення вказаної теми, щоб ефективно розв'язувати вищезгадані багатопланові завдання з розподілом ресурсів хмар. Відсутність ґрунтовних досліджень, що охоплюють різноманітні аспекти ефективного розподілу інформаційних ресурсів для їх оптимізації, розробки підходів, методів оптимізації, цільових ресурсів та типів використання мотивувало огляд відомих схем розподілу хмарних ресурсів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Хмарні системи обчислюють інформаційні ресурси за потребою та відповідно до рахунків за використаний ресурс і водночас як мультиплексування багатьох споживачів на тій самій фізичній і програмній інфраструктурі. Ці середовища для хмарних обчислень створюють ілюзію для кінцевого споживача про теоретично необмежені обчис-

лювальні хмарні ресурси, що свого часу дає змогу користувачам збільшити або зменшити їхній рівень використання ресурсів відповідно до обчислювальних вимог та вимог бюджету. Хмарне обчислення розподіляє завдання на пул обчислювальних ресурсів, який складається із численних комп'ютерів, і це дозволяє кінцевим користувачам отримати доступ до потужностей, зберігання та послуг інформації відповідно до їхніх вимог. З погляду використання технологій, хмарні обчислення розвиваються паралельно з комп'ютерними моделями, такими як сіткові, паралельні та розподілені обчислення. По суті, хмарне обчислення є поєднанням технології віртуалізації ресурсів і серверів разом з іншими інформаційними технологіями [1; 2].

Хмарне обчислення – це інноваційна бізнес-модель, основною частиною якої є надання користувачам платних послуг за умови використання її ресурсів в одному або декількох центрах обробки даних. Як інноваційна модель для хмарних обчислень вона продовжує стикатися з багатьма новими проблемами, які потребують чіткого опису відносин та діяльності усіх суб'єктів, щоб полегшити технічну розробку. Застосування хмарних обчислень, як інформаційної моделі, орієнтованої на користувачів, стає сучасною переконливою парадигмою, і багато організацій приймають та використовують її у своїх бізнес-моделях, оскільки такі обчислення розширюють спектр бізнес-можливостей, особливо у частині фінансових інвестицій та людського капіталу.

За допомогою хмарних сервісів організація може вибрати центр обробки даних для своєї ІТ-інфраструктури або придбати апаратне та про-

грамне забезпечення для своїх бізнес-додатків, оскільки вони можуть орендувати ресурси від постачальника послуг хмарної служби. Іншою перевагою використання хмарних ресурсів є їх об'єднання для обслуговування декількох абонентів. Провайдер застосовує модель багаторазового використання, у якій ресурси (фізичні та віртуальні) мультиплекуються динамічно, виходячи з вимог замовника. Виділення необхідного обсягу ресурсів для обчислювальної системи буде ґрунтуватися на угоді про оренду та SLA (Service level agreement), згідно з якими для різних клієнтів та їхніх потреб потрібні різні обсяги віртуальних ресурсів. Згодом зростання попиту на використання хмарних сервісів спричинило для постачальників додаткові проблеми зі збільшення кількості та можливостей хмарних ресурсів для ефективного управління потребами.

Наскільки нам відомо, не існує всеосяжного наукового дослідження, яке конкретно охоплювало би схеми розподілу хмарних ресурсів, використовуючи тематичну систематику з такими атрибутами, як цілі оптимізації, підходи до проектування, методи оптимізації та корисні функції. Отже, виділені аспекти можуть допомогти дослідникам і науковцям краще зрозуміти проблематику в цій галузі досліджень. Здійснивши системний аналіз наукових публікацій та прикладних статей, пов'язаних зі згаданою темою, можемо констатувати, що більшість авторів зосередили свою увагу на розподілі ресурсів у хмарному середовищі з різними обсягами та перспективами. У Таблиці 1 наведено перелік цих пов'язаних статей разом з описом відмінностей від нашого дослідження. На підставі останніх та обмежень, наведених у Таблиці 1, і року наукової публікації статті можемо написати новий огляд, метою якого є відображення і класифікація останньої наявної літератури на основі тематичної таксонометрії.

Постановка завдання. Головний напрям цього дослідження включає:

Системний аналіз та класифікацію сучасного стану інформаційних технологій в області використання хмарних ресурсів та їх розподілу згідно з тематичною систематикою.

Системний аналіз відомих хмарних схем розподілу ресурсів на основі розроблених характеристик електронної тематичної таксономії.

Системний аналіз наукової літератури, у якій викладена необхідна інформація, для оптимізації розробки схем розподілу хмарних ресурсів.

Виклад основного матеріалу дослідження. У доступній розглянутій літературі виявлено ряд

можливостей для оптимізації дизайну схем розподілу ресурсів хмар, щоб розробити програмні додатки. З моменту появи хмарних сервісів було запропоновано велику кількість схем розподілу та використання хмарних ресурсів. Щоб забезпечити коректний вибір відповідних документів, ми сформулювали такий рядок пошуку: [((((“ Хмарні обчислення “) & (“ розподіл ресурсів “) & (схеми OR алгоритми OR техніки OR методи OR архітектури OR структури)))]].

У подальших дослідженнях ми використали вказану сигнатуру запиту у вибраних базах даних пошуку (наприклад, Scopus, ACM DL, IEEE Xplore, ScienceDirect і SpringerLink). Наступним етапом дослідження було виокремлення лише тих потенційних документів, які задовольняють такі критерії:

1. Опубліковані у рецензованих наукометричних журналах, написаних англійською мовою та виданих у 2009–2018 рр.

2. Ключові слова «розподіл ресурсів» та «хмара» (обчислень) мають бути у заголовку статті.

Хмарні обчислення. Основна ідея хмарних обчислень полягає в тому, щоб використати обчислювальні ресурси як служби у всьому просторі Інтернету. Користувачам не потрібно вкладати капітал в обчислювальну інфраструктуру для своїх бізнес-потреб. Замість цього вони можуть орендувати послуги хмарних обчислень. Обчислювальний вузол лежить в основі апаратного забезпечення, як правило, розміщується у центрах обробки даних, оснащених різноманітними інформаційними технологіями віртуалізації, щоб досягти високого рівня масштабованості, швидкості та доступності. Отже, технологія використання віртуальних машин стає все більш актуальною для створення систем підприємств на платформі хмарних обчислень, на відміну від звичайної локальної обчислювальної системи, в яку користувач повинен інвестувати значні фінансові ресурси у спеціальне обладнання та програмне забезпечення, яке автоматично виділяє система хмарних обчислень у вигляді віртуалізованих апаратних та програмних ресурсів користувачам на вимогу поставленого бізнес-завдання через Інтернет. Такий підхід значно знижує витрати на розміщення та обслуговування під час розв'язання бізнес-завдання.

Сервісні моделі хмарних обчислень визначені Національним інститутом науки і техніки як технології (NIST), а програмне забезпечення – як сервіс (SaaS). Споживач отримує доступ до програм

від різноманітних пристроїв клієнтів через Веб-браузер або Інтернет-програму. Остання лежить в основі хмарної інфраструктури, що складається з мережі, серверів, операційних систем, сховищ даних або індивідуальних можливостей програм, які не управляються або не контролюються споживачем цих послуг, за винятком користувачів специфічних програм та параметрів конфігурації.

Платформа як служба (PaaS). Потужність, надана споживачеві, – це розгорнута хмарна інфраструктура, створена користувачем або придбаним

додатком, яка використовує мови програмування, бібліотеки, служби та інструменти, підтримувані провайдером. Споживач не керує та не контролює базову хмарну інфраструктуру, включаючи мережу, сервери, операційні системи або сховище, але має контроль над розгортанням програми та, можливо, конфігураційними параметрами для хостингу додатків у навколишньому середовищі.

Інфраструктура як служба (IaaS). Потужність, надана споживачеві, полягає у забезпеченні обробки, зберігання, мереж та інших основних

Таблиця 1

Таксонометрія тематичної літератури з використання хмарних технологій

Література	Рік публікації	Класифікація тематики
[4; 5; 17]	2014, 2010, 2014	Література узагальнена на підставі енергоефективної таксономії дослідження, тоді як у нашому дослідженні таксономія базується на різних цілях оптимізації.
[6]	2013	Зосереджені лише на проблемах із моніторингу ресурсів, запропонованих для систем хмарних обчислень, хоча цей огляд, як правило, охоплює рішення щодо розподілу ресурсів для систем хмарних обчислень.
[7]	2014	Описує концептуальну основу для керування хмарними ресурсами та використовує її для структурування сучасного огляду, тоді як у нашому дослідженні огляд охоплює літературу з поглядом тематичної систематики.
[8; 9]	2012	Обмежений вибір літератури разом із відсутністю таксономічної класифікації та порівняння.
[11]	2011	Орієнтоване лише на аналіз загроз безпеки у системах хмарних обчислень.
[12]	2011	Акцент зроблено на вивченні мережесхемних рішень для розробки архітектур хмарних обчислень.
[13]	2009	Використовує архітектурну таксономію для виявлення подібностей та відмінностей архітектур хмарних рішень, тоді як ми зосереджуємося на таких аспектах, як ціль оптимізації, метод проектування та методи оптимізації.
[14]	2013	Досліджувався робочий механізм постачальників комерційних хмарних сервісів і рішень для розробки хмарних технологій із відкритим кодом, тоді як наш огляд зосереджувався на літературному внеску, спрямованому на розподіл ресурсів у системі хмарних обчислень.
[15]	2013	Зосереджені лише на рішеннях, запропонованих для функцій управління ресурсами в середовищі IaaS.
[16]	2013	Розглянуто стратегії розподілу базових ресурсів та планування завдань з огляду на те, що комунальні системи хмарних обчислень, які базуються на SaaS, є основною інфраструктурою, тоді як наше дослідження охоплює переважно механізми розподілу ресурсів, пов'язані із системами обласного обчислення IaaS у програмах.
[18; 19]	2015	Розглядаються лише методи вивчення оптимізації міграції віртуальної машини для центрів обробки даних у хмарі, при цьому наше дослідження зосереджується на більш широкому аспекті цілей оптимізації, що застосовуються в механізмах розподілу ресурсів для програмної інженерії.
[10]	2018	У цьому документі розглядається ієрархічна структура контролю, яка має на меті скомпрометувати антагоністичні цілі всередині центру обробки даних. Місцевий контрольний рівень одночасно вирішує проблеми розподілу ресурсів та контролю доступу віртуальних машин, тоді як верхній рівень враховує балансування завантаження вхідних запитів і розміщення віртуальних машин у кластері фізичних серверів. Числові результати показують, що співпраця двох контрольних шарів гарантує задоволення обмежень системи та вимог користувача до коливань вхідних запитів.

обчислювальних ресурсів, де споживач може розгорнути та запустити будь-яке програмне забезпечення. Останній не керує та не контролює основну хмару інфраструктури, але має контроль над операційними системами, сховищами та розгорнутими додатками, а також над вибраними мережевими компонентами.

Останніми роками спостерігається різке зростання доступності та попиту на хмарний сервіс. Так, EC2 Amazon є однією з найбільш використовуваних хмарних служб. Вона пропонує різні типи віртуальної машини (VM) з різними можливостями. Користувачі орендують кілька віртуальних екземплярів, щоб запускати свої програми, та оплачують лише час роботи додатку. Сервіси Rackspace та Joyent пропонують схожі послуги. Оскільки такі служби доступні всім, їх часто називають «публічними» хмарами. А «приватна» хмара, навпаки, відноситься до інфраструктури, яка функціонує виключно для однієї організації. Наприклад, Eucalyptus є програмним сервісом для розгортання приватного обчислювального середовища, сумісного з EC2 Amazon. Політика розподілу ресурсів є модульною та розширюваною.

Користувачі хмар орендують обчислювальні ресурси, місце зберігання та пропускну здатність із мінімальним розрахунком часу (годину або менше) із практично миттєвим наданням цих ресурсів (протягом хвилини або кількох секунд). Такі системи контрастують із традиційним дата-центром, у якому орендувати обладнання можливо на декілька місяців, а надання резервних ресурсів відбувається протягом кількох днів. Використовуючи контейнерні механізми, такі як віртуальні машини, більшість хмарних систем здатні безпечно мультиплексувати багатьох клієнтів на тій самій фізичній інфраструктурі та забезпечувати економічно ефективну послугу. Водночас, щоб розмістити велику кількість клієнтів одночасно, хмарна система повинна бути великою. У такому разі вона складається із серверів, що поширюються на багато стійок, і навіть центрів обробки даних. Це дозволяє хмарним системам забезпечити економію у масштабі, який раніше був доступний лише найбільшим підприємствам.

Розподіл хмарних ресурсів як сервісів. Концепція розподілу ресурсів – це розподіл послуг постачальником для клієнта. Розподіл ресурсів – це процес економічного поділу ресурсів між конкурентними групами програм або користувачів. Ресурси планування – це графік розподілу ресурсів, у якому останні є спільними і доступними у певні проміжки часу, для ефективності обчис-

лювальної події, запланованої на певний момент. Інакше кажучи, це визначення часу, коли обчислювальна діяльність повинна починатися. Крім того, розподіл хмарних ресурсів – це процес пошуку, виділення, забезпечення, планування додатків та управління ресурсами. Він передбачає прийняття рішень стосовно того, як багато, що, коли і де виділити користувачеві. Як правило, споживачі визначають кількість та тип ресурсів для запитів, а у відповідь постачальники послуг виділяють запитувані контейнери ресурсів і центри обробки даних. Для ефективного виконання прикладних програм ресурсні контейнери повинні бути достатніми для задоволення потреб і мають відповідати характеристикам робочого навантаження. Адаптивність у хмарному обчислювальному середовищі дає змогу користувачам запитувати або повертати ресурси динамічно. Основним елементом механізму розподілу хмарних ресурсів є його керівний потік.

Середовище хмарних обчислень складається із двох «гравців»: постачальників хмарних сервісів (CSP) та їхніх користувачів (CSC). З одного боку, постачальники теоретично зберігають необмежені обчислювальні ресурси у своїх центрах обробки даних, а орендують ці ресурси користувачі. З іншого боку, споживачі мають різні варіанти застосування, робочі навантаження й різні умови оренди обчислювальних ресурсів для запуску своїх програм у хмарі. Так, користувач надсилає запит на ресурси, після його отримання постачальник шукає ресурс для задоволення запиту і призначає його цьому споживачеві. Тоді користувач застосовує призначений ресурс для запуску програм із подальшою його оплатою. Коли користувач закінчив із виділеними ресурсами, останні повертаються провайдеру.

Висновки. У нашому дослідженні абстрактно розкрито основні поняття виділення та використання хмарних ресурсів. Крім того, воно допоможе нам ефективно проаналізувати прогалини, які вже утворилися у відомих схемах розподілу хмарних ресурсів, та окреслити коло важливих питань для подальшого вивчення.

На сьогодні запропоновано численні механізми розподілу ресурсів для хмарних обчислень. Однак є проблеми, які потребують дослідження для розвитку більш економічно вигідних схем розподілу. Основну увагу щодо аналізованої теми слід приділити підвищенню продуктивності, безпеці, безперервній міграції віртуальної машини, сумісності, відновленню, стійкості до невдач і зниженню експлуатаційних витрат центрів обробки даних разом зі зменшенням суми накладних витрат, сплачених споживачам.

Список літератури:

1. Aceto G., Botta A., de Donato W., Pescapè A. Cloud monitoring: a survey. *Computer Network*. 2013. № 57(9). P. 2093–2115.
2. Ahmad R.W., Gani A., Hamid S.H.A., Shiraz M., Yousafzai A., Xia F. A survey on virtual machine migration and server consolidation frameworks for cloud data centers. *Journal of Network and Computer Applications*. 2015. № 52. P. 11–25.
3. Ahmad R.W., Gani A., Hamid S.H.A., Shiraz M., Xia F., Madani S.A. Virtual machine migration in cloud data centers: a review, taxonomy, and open research issues. *The Journal of Supercomputing*. 2015. № 71(7). P. 2473–2515.
4. Ahmed M., Chowdhury A. An advanced survey on cloud computing and state-of-the-art research issues. *International Journal of Computer Science Issues*. 2012. № 9(1). P. 1694–1814.
5. Atzori L., Granelli F., Pescapè A. A network-oriented survey and open issues in cloud computing. *Cloud Computing: Methodology, Systems, and Applications*. Florida: CRC Press, 2011. P. 91–108.
6. Beloglazov A., Buyya R., Lee Y.C., Zomaya A. A taxonomy and survey of energy-efficient data centers and cloud computing systems. *Advanced Computing*. 2011. № 82(2). P. 47–111.
7. Buyya R., Yeo C.S., Venugopal S., Broberg J., Brandic I. Cloud computing and emerging IT platforms: vision, hype, and reality for delivering computing as the 5th utility. *Future Generation Computer Systems*. 2009. № 25(6). P. 599–616.
8. Choubey R., Dubey R., Bhattacharjee J. A survey on cloud computing security, challenges and threats. *International Journal on Computer Science and Engineering*. 2011. № 3(3). P. 1227–1231.
9. Dillon T., Wu C., Chang E. Cloud computing: issues and challenges. 24th IEEE international conference on advanced information networking and applications. 2010. P. 27–33.
10. Foster I., Zhao Y., Raicu I., Lu S. Cloud computing and grid computing 360-degree compared. *Grid computing environments workshop*. 2008. № 4. P. 1–10.
11. Goyal A., Dadizadeh S. A survey on cloud computing. *University of British Columbia Technical Report for CS*. 2009. № 508. P. 55–58.
12. Hameed A., Khoshkbarforousha A., Ranjan R., Jayaraman P. A survey and taxonomy on energy efficient resource allocation techniques for cloud computing systems. *Computing*. 2014. DOI: 10.1007/s00607-014-0407-8.
13. Huang L., Chen H., Hu T. Survey on resource allocation policy and job scheduling algorithms of cloud computing. *Journal of Statistical Software*. 2013. № 8(2). P. 480–487.
14. Hussain H., Malik S.U.R., Hameed A. A survey on resource allocation in high performance distributed computing systems. *Parallel Computing*. 2013. № 39(11). P. 709–736.
15. Jennings B., Stadler R. Resource management in clouds: Survey and research challenges. *Journal of Network and Systems Management*. 2015. № 23(3). P. 567–619.
16. Manvi S.S., Shyam G.K. Resource management for infrastructure as a service (IaaS) in cloud computing: a survey. *Journal of Network and Computer Applications*. 2013. № 41. P. 424–440.
17. Leontioua N., Dechouniotis D., Denazisa S., Papavassiliou S. A hierarchical control framework of load balancing and resource allocation of cloud computing services. *Computers & Electrical Engineering*. 2018. № 67. P. 235–251.
18. Shuja J., Bilal K., Madani S.A., Othman M., Ranjan R., Balaji P., Khan S.U. Survey of techniques and architectures for designing energy-efficient data centers. *IEEE Systems Journal*. 2014. № 99. P. 1–13.
19. Vinothina V., Sridaran R., Ganapathi P. A survey on resource allocation strategies in cloud computing. *International Journal of Advanced Computer Science & Applications*. 2012. № 3(6). P. 97–104.

**СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ОБЛАЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ПРОГРАММНЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ**

В статье рассмотрены теоретические и практические основы разработки приложений как составляющих больших информационных систем с использованием облачных технологий для обеспечения ускорения разработки и минимизации финансовых затрат на программный проект. Проведен системный анализ научных публикаций в разрезе предоставления и использования облачных технологий. Акцентировано на таких основных направлениях исследования, как системный анализ и классификация современного состояния информационных технологий в области использования облачных ресурсов, изучение существующих облачных схем распределения ресурсов на базе разработанной характеристики электронной тематической таксономии, анализ научной литературы, в которой изложена информация по оптимизации разработки схем распределения облачных ресурсов.

Ключевые слова: программное приложение, облачная технология, инновационная модель, системный анализ, бизнес-логика.

**SYSTEM ANALYSIS OF CLOUD TECHNOLOGY
FOR THE DEVELOPMENT OF SOFTWARE APPLICATIONS**

The theoretical and practical principles of development of software applications as the components of large information systems with the use of cloud technologies that provide acceleration of development and minimization of financial expenses for a software project are considered. System analysis of scientific publications in the context of the provision and use of cloud technologies has been carried out. The main areas of research are focused such as system analysis and classification of the current state of information technologies in the use of cloud resources, system analysis of existing cloud resource allocation schemes based on the developed characteristics of the electronic thematic taxonomy, systematic analysis of scientific literature, which outlines the information, to optimize the development of schemes for the distribution of cloud resources.

Key words: *software application, cloud technology, innovative model, system analysis, business logic.*

Петросян А.А.

Одеський національний політехнічний університет

Давидов В.О.

Одеський національний політехнічний університет

АВТОМАТИЧНА СИСТЕМА РЕГУЛЮВАННЯ ЕКОНОМІЧНОСТІ ПАРОВОГО КОТЛА ГМ-50

Сьогодні системи автоматизованого управління стали невід'ємною частиною практично всіх сфер матеріального виробництва. Застосування автоматизованих систем регулювання значно сприяє підвищенню надійності й економічності роботи обладнання виробничих процесів і, зокрема, теплоенергетичних виробництв, а також розв'язанню екологічних проблем. Автоматизація впевнено та рішуче ввійшла у повсякденне життя не лише виробників, а й пересічного жителя, усе більшим чином витісняючи досягнення механізації.

За останнє десятиріччя істотно змінилися склад і структура технологічних засобів, що застосовуються в автоматизованих системах управління технологічними процесами.

Подальше вдосконалення виробництва, ускладнення реалізованих технологій призводять до такої ситуації, за якої управління технологічним процесом, виконання необхідного режиму експлуатації та технологічного регламенту можливі лише за посередництва автоматизованих систем управління, що відповідає найсучаснішим вимогам.

Ключові слова: паровий котел, автоматизована система управління, оптимізація процесу горіння, паливо, частотний перетворювач.

Постановка проблеми. Значне зростання цін на енергоносії та загострення екологічних проблем ставить все більш суворі вимоги до систем автоматичної оптимізації процесу спалювання органічного палива.

Більшість автоматичних систем регулювання співвідношення «паливо – повітря» досі застосовують коригувальний сигнал за величиною вмісту кисню O_2 в димових газах і побудовані з використанням стаціонарних киснемірів. Такі системи здебільшого не придатні для роботи в режимі автоматичного регулювання внаслідок спотворення концентрації кисню в димових газах неконтрольованими присосами повітря у газовому тракті, неідентичності характеристик паливників у багатопальникових котлах, коливань вологості повітря, змін теплотворної здатності і виду палива тощо [1, с. 50].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження парових котлів проводяться досить давно. Уже створено та експлуатуються багато котельних установок. Паровий котел – основний агрегат теплової електростанції (ТЕС). Робочим тілом у ньому для отримання пари є вода, а теплоносієм слугують продукти горіння різних органічних палив. Необхідна теплова потужність парового котла визначається його паропродуктивністю для забезпечення встановлених темпера-

тури і робочого тиску перегрітої пари. При цьому в топці котла спалюється розрахована кількість палива [4, с. 151–170].

Оптимізація процесу горіння, що зводиться до підтримання режиму на межі хімічного недопалу, не допускаючи при цьому значних перевитрат палива, ґрунтується на вимірюванні мікроконцентрацій складників хімічного недопалу q_3 в димових газах – оксиду вуглецю CO і/або водню H_2 , причому ці параметри мають високу чутливість до зміни характеристик процесу спалювання і майже нечутливі до підсосів повітря у газовому тракті котла [2, с. 26–28].

Постановка завдання. Метою статті є дослідити автоматичну систему регулювання економічності парового котла ГМ-50, розробити її математичну модель.

Виклад основного матеріалу дослідження. Склад продуктів спалювання палива визначається температурою, загальним тиском, під яким перебуває газова суміш, а також масовими частками хімічних елементів, що входять до сполук, які утворюють продукти спалювання [3, с. 56–59]. Розрахунок складу продуктів спалювання з урахуванням дисоціації починається зі складання таких рівнянь:

– рівнянь констант рівноваги тих реакцій дисоціації, що мають значення в розрахунку;

– рівнянь балансу елементів, що входять до паливної суміші;

– рівняння повного тиску продуктів спалювання.

Внаслідок горіння вуглеводнів у повітрі утворюються продукти спалювання палива, що містять тільки чотири елементи: вуглець, водень, кисень і азот.

Рівняння реакцій дисоціації записуються в такому вигляді:

$$\begin{cases} \text{CO}_2 \leftrightarrow \text{CO} + \frac{1}{2} \cdot \text{O}_2 \\ K_1 = \frac{p_{\text{CO}} p_{\text{O}_2}^{0.5}}{p_{\text{CO}_2}} = f_1(T) \end{cases}, \quad (1)$$

$$\begin{cases} \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{H}_2 + \frac{1}{2} \cdot \text{O}_2 \\ K_2 = \frac{p_{\text{H}_2} p_{\text{O}_2}^{0.5}}{p_{\text{H}_2\text{O}}} = f_2(T) \end{cases}, \quad (2)$$

$$\begin{cases} \text{CO}_2 + \text{H}_2 \leftrightarrow \text{CO} + \text{H}_2\text{O} \\ K_3 = \frac{p_{\text{CO}} p_{\text{H}_2\text{O}}}{p_{\text{CO}_2} p_{\text{H}_2}} = f_3(T) \end{cases}, \quad (3)$$

$$\begin{cases} \text{N}_2 + \text{O}_2 \leftrightarrow 2\text{NO} \\ K_4 = \frac{p_{\text{NO}}^2}{p_{\text{N}_2} p_{\text{O}_2}} = f_4(T) \end{cases}, \quad (4)$$

$$\begin{cases} \text{H}_2 \leftrightarrow 2\text{H} \\ K_5 = \frac{p_{\text{H}}^2}{p_{\text{H}_2}} = f_5(T) \end{cases}, \quad (5)$$

$$\begin{cases} \text{N}_2 \cdot 2\text{N} \\ K_7 = \frac{p_{\text{N}}^2}{p_{\text{N}_2}} = f_7(T) \end{cases}, \quad (7)$$

де K_i – константи рівноваги, які залежать тільки від температури і типу хімічної реакції. За допомогою цих величин розраховується склад продуктів спалювання.

У рівняннях реакцій дисоціації (1)–(7) містяться 10 невідомих парціальних тисків газів, що формують повний тиск продуктів спалювання. Рівняння балансу елементів, що входять до паливної суміші, складаються шляхом прирівнювання кількості елемента, який входив до паливної суміші, до кількості цього самого елемента, який входить до продукту спалювання.

Для обраної системи елементів рівняння балансу записуються в такій формі:

$$C_{r.c} = \frac{C_T + LC_0}{1 + L} = \frac{12^{1/4}}{p_\xi} (p_{\text{CO}_2} + p_{\text{CO}}), \quad (8)$$

$$H_{r.c} = \frac{H_T + LH_0}{1 + L} = \frac{1^{1/4}}{p_\xi} (p_{\text{H}_2\text{O}} + p_{\text{H}_2} + p_{\text{H}}), \quad (9)$$

$$N_{r.c} = \frac{N_T + LN_0}{1 + L} = \frac{14^{1/4}}{p_\xi} (p_{\text{N}_2} + p_{\text{N}} + p_{\text{NO}}), \quad (10)$$

$$O_{r.c} = \frac{O_T - LO_0}{1 + L} = \frac{16^{1/4}}{p_\xi} (2p_{\text{O}_2} + p_{\text{CO}_2} + p_{\text{H}_2\text{O}} + p_{\text{CO}} + p_{\text{O}}), \quad (11)$$

де L_0 – стехіометричний коефіцієнт, що визначається за формулою:

$$L_0 = -\frac{\frac{8}{3}C_T + 8H_T - O_T}{\frac{8}{3}C_0 + 8H_0 - O_0}. \quad (12)$$

Паливна суміш, у якій є необхідна кількість повітря для повного спалювання палива, є стехіометричною; за надлишку палива суміш називається багатою, а за надлишку повітря – бідною. Надлишок окислювача стосовно стехіометричної його кількості оцінюється коефіцієнтом надлишку окислювача і виражається співвідношенням:

$$\alpha = \frac{V}{V^0}, \quad (13)$$

де V – об'єм повітря, що подається для горіння.

У рівняннях балансу кількість елементів, що входять до паливної суміші, виражається в кілограмах на 1 кг паливної суміші або на 1 кг продуктів спалювання.

Рівняння балансу побудовано за таким принципом. Загальним коефіцієнтом перед дужками, у яких записана сума парціальних тисків, є відношення $\frac{\mu_\Sigma}{p_\Sigma}$ (μ_Σ – число кілограм-молів продуктів спалювання, що відповідають 1 кг паливної суміші; p_Σ – загальний тиск газів), помножене на атомну вагу елемента, для якого записується рівняння балансу. Парціальні тиски, що входять до рівняння балансу, приймаються з коефіцієнтом, рівним числу атомів елементів, що містяться в молекулі цього газу.

У рівняннях балансу з'явилися два додаткові невідомі: μ_Σ і p_Σ . Для їх визначення використовуються рівняння закону Дальтона:

$$p_\Sigma = p_{\text{CO}_2} + p_{\text{H}_2\text{O}} + p_{\text{CO}} + p_{\text{N}_2} + p_{\text{O}_2} + p_{\text{H}_2} + p_{\text{NO}} + p_{\text{H}} + p_{\text{O}} + p_{\text{N}} = 1, \quad (14)$$

$$\mu_\Sigma = \frac{p_\Sigma}{\sum_i M_i p_i} = \frac{1}{M_\Sigma}. \quad (15)$$

Наведених 13 рівнянь досить для визначення 10 парціальних тисків газів, що містяться в суміші, M_Σ , p_Σ .

На рисунках 1, 2, 3 показано залежність вмісту компонентів продуктів спалювання, що характеризують економічність процесу горіння, від коефіцієнта надлишку окислювача. Величини компонентів розраховані для газу в об'ємних відсотках: $\text{CH}_4 = 98\%$, $\text{C}_2\text{H}_6 = 1\%$, $\text{N}_2 = 1\%$; склад повітря: $\text{N}_2 = 79\%$, $\text{O}_2 = 21\%$. Також наведено графіки розрахованих наближень методом Дубовкіна.

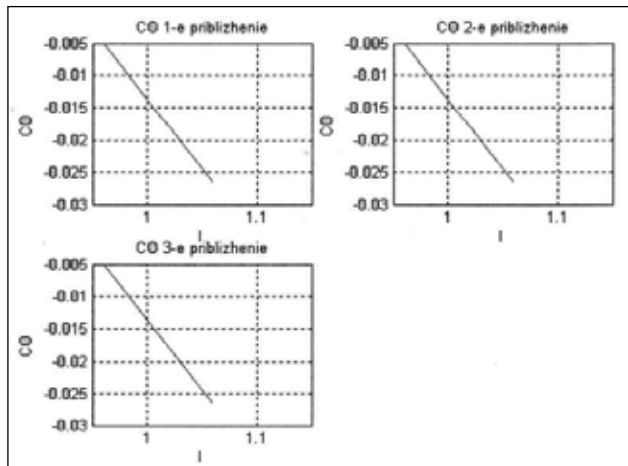


Рис. 1. Залежність вмісту компонентів продуктів спалювання від коефіцієнта надлишку окислювача

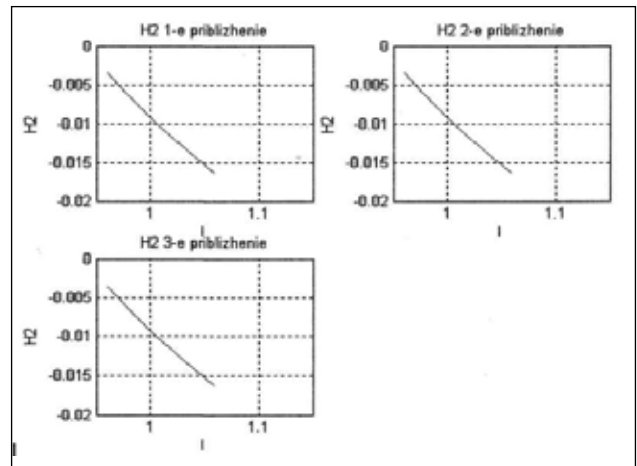


Рис. 2. Залежність вмісту H₂ від коефіцієнта надлишку окислювача

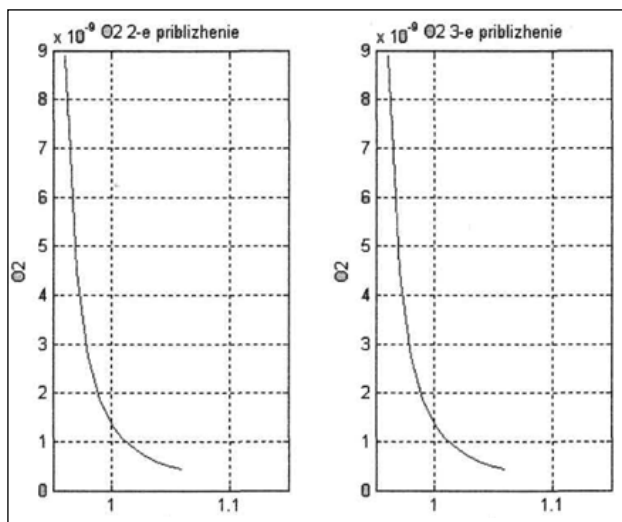


Рис. 3. Залежність вмісту O₂ від коефіцієнта надлишку окислювача

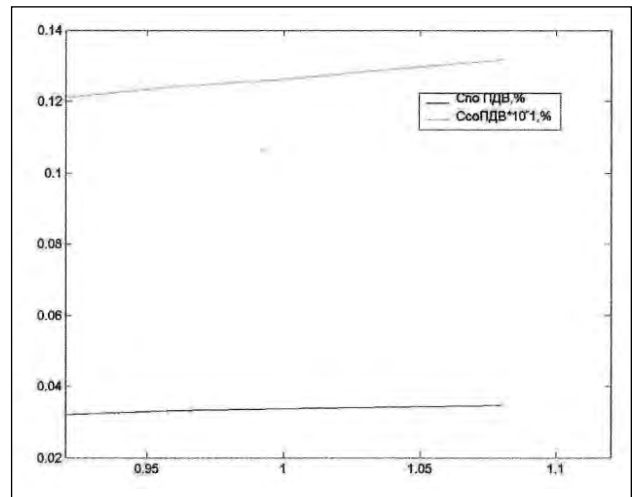


Рис. 4. Залежність гранично припустимих викидів токсичних компонентів продуктів згоряння від коефіцієнта надлишку окислювача

Для визначення токсичного складника I^T векторного критерію I необхідно знайти значення гранично припустимих викидів (далі – ГПВ) токсичних компонентів [5, с. 37].

Величина ГПВ може бути визначена з виразу, виведеного з формули для розрахунку висоти димової труби:

$$H = \left(\frac{A \cdot M \cdot F \cdot m \cdot n}{ГПК_q} \cdot \sqrt[3]{\frac{z}{V_1 \cdot \Delta T}} \right)^{0.5} \quad (19)$$

Прийнявши сумарну кількість шкідливої речовини, що викидається в атмосферу M , рівну ГПВ, можемо на підставі формули (19) розв'язати зворотню задачу: якими повинні бути викиди за відомої висоти димової труби, щоб концентрація токсичної речовини в зоні викидів не перевищила гранично припустимих концентрацій (далі – ГПК). При цьому отримуємо вираз:

$$C_q^{ГПК} = \frac{ГПК_q \cdot H^2}{A \cdot F \cdot m \cdot n} \cdot \sqrt[3]{\frac{V_1 \cdot \Delta T}{z}}, \quad (20)$$

де H – висота димової труби, м;

$ГПК_q$ – гранично допустимі концентрації q -го компонента, що лімітує чистоту повітряного басейну;

A – коефіцієнт, що залежить від температурної стратифікації атмосфери для несприятливих метеорологічних умов і визначає умови вертикального і горизонтального розсіювання шкідливих речовин в атмосферному повітрі;

F – безрозмірний коефіцієнт, що враховує вплив швидкості осадку домішок (для газоподібних шкідливих речовин $F = 1$);

m, n – безрозмірні коефіцієнти, що враховують умови виходу газоповітряної суміші з устя джерела викиду;

V_1 – об’ємна витрата газів, що викидаються, $\text{м}^3/\text{с}$;
 z – число димових труб однакової висоти, встановлених на електростанції.

Коефіцієнт m визначається залежно від параметра f :

$$m = (0,67 + 0,1\sqrt{f} + 0,34\sqrt[3]{f})^{-1}, \quad (21)$$

який визначається за формулою:

$$f = \frac{10^3 \cdot \omega_0^2 \cdot D_0}{H^2 \cdot \Delta T}, \quad (22)$$

де ΔT – різниця між температурою газів, що викидаються, і середньою температурою повітря $T_{\text{п}}$, під якою розуміють середню температуру найбільш жаркого місяця опівдні, $^{\circ}\text{C}$;

D_0 – діаметр устя димової труби, м;

ω_0^2 – швидкість виходу газів з устя димової труби, м/с.

Безрозмірний коефіцієнт n визначається залежно від параметра V_M :

$$V_M = 0,65 \cdot \sqrt[3]{\frac{V_1 \cdot \Delta T}{H}}, \quad (23)$$

при $V_M = 0,3, n = 3$,

при $0,3 < V_M \leq 2, n = 3 - \sqrt{(V_M - 0,3) \cdot (4,36 - V_M)}$,

при $V_M > 2, n = 1$.

Висновки. У роботі розглянуто вплив теплотворної спроможності палива на статичні та динамічні властивості водогрійного котла.

Виявлено, що аналіз залежностей (20)–(23) показує, що основними факторами, які впливають на величину ГПВ токсичних компонентів, є навантаження котла, коефіцієнт надлишку повітря α і кількість котлів, що викидають продукти згоряння в одну димову трубу.

Приклад залежності ГПВ від коефіцієнта надлишку повітря, які розраховані для умов роботи двох парогазових блоків потужністю по 250 МВт на одну димову трубу за повного навантаження, наведено на Рис. 4.

На графіках можливо побачити, що ГПВ токсичних компонентів димових газів лінійно залежать від коефіцієнта надлишку повітря α . Крім того, вплив α на зміну ГПВ незначний, що дозволяє прийняти значення ГПВ постійними для всієї області змін α . У зв’язку з тим, що оптимальне значення α лежить в області, близькій до $\alpha = 1$, значення ГПВ варто вибирати так само відповідно до цієї області.

Список літератури:

1. Демченко В.А. Автоматизация и моделирование технологических процессов АЭС и ТЭС. Одесса: Астропринт, 2001.
2. Візок Г.М., Хойна Є.В., Ягов Г.В. Новий підхід до оптимізації режимів горіння палива. Енергонагляд-Інформ. 2008. С. 26–28.
3. Автоматичний пристрій для визначення та коригування повноти спалювання вуглеводневих сумішей і газів / В.Ф. Бабіч, В.Ю. Вадов, В.С. Полонік. 1983.
4. Александров В.Г. Паровые котлы средней и малой мощности. Москва, 1972.
5. Системы автоматизации технологических процессов. Розрахунок електричних виконавчих механізмів при проектуванні. Москва, 1979.

АВТОМАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ ЭКОНОМИЧНОСТИ ПАРОВОГО КОТЛА ГМ-50

Сегодня системы автоматизированного управления стали неотъемлемой частью практически всех сфер материального производства. Применение автоматизированных систем регулирования значительно способствует повышению надежности и экономичности работы оборудования производственных процессов и, в частности, теплоэнергетических производств, а также решению экологических проблем. Автоматизация уверенно и решительно вошла в повседневную жизнь не только производителей, но и рядового жителя, все большим образом вытесняя достижения механизации.

За последнее десятилетие существенно изменились состав и структура технологических средств, применяемых в автоматизированных системах управления технологическими процессами.

Дальнейшее совершенствование производства, усложнение реализованных технологий приводят к такой ситуации, при которой управление технологическим процессом, выполнение необходимого режима эксплуатации и технологического регламента возможны только при посредстве автоматизированных систем управления, отвечающий самым современным требованиям.

Ключевые слова: паровой котел, автоматизированная система управления, оптимизация процесса горения, топливо, частотный преобразователь.

**AUTOMATIC SYSTEM OF REGULATION
OF ECONOMY OF THE GAM-50 COUPLING BOILER**

At present, automated control systems have become an integral part of virtually all spheres of material production. The use of automated control systems greatly contributes to increasing the reliability and cost-effectiveness of equipment production processes and in particular thermal power plants, as well as solving environmental problems. Automation confidently and decisively entered into everyday life of not only producers, but also ordinary inhabitants, increasingly pushing the achievements of mechanization.

Over the past decade, the composition and structure of technological tools used in automated control systems of technological processes have changed significantly.

Further improvement of production, complication of implemented technologies leads to a situation in which the control of the technological process, the implementation of the necessary operating conditions and technological regulations are possible only through the intermediation of automated control systems that meet the most advanced requirements.

Key words: *steam boiler, automated control system, optimization of combustion process, fuel, frequency converter.*

Повхан І.Ф.

ДВНЗ «Ужгородський національний університет»

ПРОБЛЕМА ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ ОЦІНКИ НАВЧАЛЬНОЇ ВИБІРКИ В ЗАДАЧАХ РОЗПІЗНАВАННЯ ДИСКРЕТНИХ ОБ'ЄКТІВ

Статтю присвячено актуальній проблемі оцінки навчальної вибірки на основі функціоналів. Правильна оцінка вибірки дозволяє побудувати ефективне правило класифікації, що забезпечує просте та повне розпізнавання дискретних об'єктів.

Ключові слова: розпізнавання дискретних об'єктів, важливість аргументів, функція розпізнавання.

Постановка проблеми. У процесі розв'язання практичних завдань із розпізнавання дискретних об'єктів часто доводиться стикатися з такими моментами:

- кодування вихідної інформації;
- перевірка та оцінка навчальної вибірки;
- знаходження важливості ознак і груп ознак;
- мінімізація вихідного опису;
- визначення якості кодування вихідної інформації;
- побудова множини алгоритмів розпізнавання і знаходження коректного алгоритму для певної задачі.

Указані завдання доводиться вирішувати в рамках деяких обмежень: час; пам'ять; ефективність та інше.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідженням порушеної проблеми займалися такі науковці, як І.Ф. Повхан, Ю.А. Василенко, Е.Ю. Василенко та інші.

Постановка завдання. Метою статті є знайти шляхи розв'язання проблеми функціональної оцінки навчальної вибірки в завданнях із розпізнавання дискретних об'єктів.

Виклад основного матеріалу дослідження. Кодування вихідної інформації. Якщо об'єкти із множини G є деякими точками n -вимірного простору, то завжди, за умови вихідної різниці між класами, можемо розбити n -вимірний простір, обмежений можливими значеннями ознак, гіперплощинами, на n -мірні гіперпаралелепіеди так, щоб точки з різних класів не попадали в один і той самий паралелепіед. Після цього кожному гіперпаралелепіеду в n -мірному просторі можливо поставити у відповідність двійковий код. Ці двійкові коди, залежно від того, куди попадають об'єкти із множини G , і визначають набір бінарних ознак завдання розпізнавання.

Поняття навчальної вибірки (далі – НВ), зокрема проблема її функціональної оцінки, як

відомо, є одним із найважливіших у теорії розпізнавання об'єктів. На його основі запропоновано різноманітні алгоритми розпізнавання, а також визначено відносну важливість ознак у дискретному наборі [1].

У статті розглядаються деякі функціонали, що розраховуються безпосередньо за НВ, які дозволяють вирішувати доволі широке коло завдань стосовно розпізнавання об'єктів та технічної діагностики. Як показано далі, такі функціонали відносяться до загальних та більш широких понять, ніж поняття НВ.

Нехай НВ задана в такому вигляді:

$$(x_1, f_R(x_1)), \dots, (x_M, f_R(x_M)), \quad (1)$$

де $x_i \in G$ (G – деяка множина);

$f_R(x_i) \in \{0, 1, 2, \dots, k-1\}$, ($i = 1, 2, \dots, M$), а, відповідно, $f_R(x_i) = l$, ($0 \leq l \leq k-1$) означає, що $x_i \in H_l$, $H_l \subset G$. Тут f_R – деяка гранична функція, яка задає розбиття R множини G , що складається з підмножин (образів) $H_0, H_1, H_2, \dots, H_{k-1}$.

Таким чином, НВ – це сукупність (точніше послідовність) деяких наборів, причому кожний набір – це комплекс значень певних ознак і функцій у цьому наборі. Сукупність значень ознак – це зображення, а значення функції відносить це зображення до відповідного об'єкта [2].

Визначимо наступний функціонал за НВ з огляду на (1):

$$W(x_i) = \sum_{j=0}^{k_i-1} \frac{b_j}{h} \rho_j, \quad \rho_j = \max_{0 \leq m \leq k} \frac{q_j^m}{b_j}, \quad (2)$$

де b_j – кількість наборів НВ, у яких $x_i = j$, ($j = 0, \dots, k_i - 1$);

q_j^m – кількість наборів НВ, у яких $x_i = j$, а

$f_R(x) = m$, ($j = 0, 1, \dots, k_i - 1$), ($m = 0, 1, \dots, k - 1$);

h – кількість усіх наборів НВ.

При $k_1 = k_2 = \dots, k_n = k = 2$ (бінарний випадок) функціонал (2) набуває більш простого вигляду:

$$W(x_i) = \frac{1}{h} (\max_m q_0^m + \max_m q_1^m), \quad (3)$$

де q_0^m, q_1^m, h має той самий сенс, що і в (2).

Функціонал (2) отримуємо з таких міркувань (3). Величину $\frac{q_j}{b_j}$ можливо інтерпретувати як імовірність того, що функція f_R з (1) набуває значення $m, (0 \leq m \leq k-1)$ за умов, що значення ознаки x_i дорівнює $j, (0 \leq j \leq k_i - 1)$.

Величина ρ_j є максимальною з указаних імовірностей. Варто зазначити, що величина ρ_j – це та інформація, яку можливо отримати про значення функції $f_R(x)$, знаючи, що в наборі x значення ознаки x_i дорівнює j .

Величина $W(x_i)$ визначається функціоналом (2), характеризує ту інформацію, яку можливо отримати про функцію $f_R(x)$, знаючи значення ознаки x_i в наборі x .

Відтак ознака $x_i, (1 \leq i \leq n)$, для якої вказана інформація є найбільшою, є найважливішою стосовно $f_R(x)$, тобто функції, яка розбиває НВ на об'єкти.

Узагальненням функціоналу (2) (він залежить від однієї функції (ознаки) $f_i(x_1, \dots, x_n) = x_i$) є наступний функціонал, який залежить від групи ознак (функцій):

$$W(x_1, \dots, x_\gamma) = \sum_{\Delta \in Q} \frac{B_\Delta}{h} \delta_\Delta, \quad (4)$$

$$\delta_\Delta = \max_{0 \leq m \leq k-1} \frac{B_\Delta^m}{B_\Delta},$$

де $\Delta = t_1 t_2 \dots t_\gamma, (0 \leq t_j \leq k_j - 1), (j = 1, 2, \dots, \gamma)$ – довільний набір ознак;

B_Δ – кількість усіх наборів НВ, для яких виконується співвідношення $x_j = t_j, (j = 1, 2, \dots, \gamma)$;

B_Δ^m – кількість усіх наборів НВ, для яких виконується співвідношення $x_j = t_j, (j = 1, 2, \dots, \gamma)$ та $f_R(x_1, \dots, x_n) = m, (0 \leq m \leq k-1)$;

Q – множина всіх наборів ознак x_1, \dots, x_γ .

Обґрунтування функціоналу (4) аналогічне обґрунтуванню функціоналу (2). Функціонал (4) визначає важливість групи ознак x_1, \dots, x_γ стосовно $f_R(x)$.

Практично для обчислення функціоналу (4) зручніше використовувати таку формулу:

$$W(x_1, \dots, x_\gamma) = \frac{1}{h} \sum_{\Delta \in Q} \max B_\Delta^m, (m = 0, 1). \quad (5)$$

Таким чином, загалом

$$W(x_i, \dots, x_i), (1 \leq \gamma \leq n). \quad (6)$$

При $\gamma = 1$ визначає важливість ознаки $x_i, (i = 1, 2, \dots, n)$ стосовно $f_R(x)$, а у випадку $1 < \gamma \leq n$ – важливість групи ознак x_i, \dots, x_i щодо $f_R(x)$.

Очевидно, що $\frac{1}{k} \leq W(x_i, \dots, x_i) \leq 1, (1 \leq \gamma \leq n)$.

Функціонал (6) розраховується безпосередньо за НВ, він є загальним та ширшим поняттям порівняно з поняттям тесту.

Дійсно, якщо числова величина вказаного функ-

ціоналу дорівнює одиниці, то група ознак, від яких він залежить, є тестом [2; 3]. Ця особливість функціоналу (6) дає можливість запропонувати на його основі алгоритм знаходження всіх тупикових тестів НВ. Таким чином, поняття тесту можливо розглядати як деякий частковий випадок функціоналу (6).

Водночас при $W < 1$ функціонал (6) уможливує безпосередньо за НВ визначити важливість ознак (однієї або групи) стосовно функції, яка задає розбиття НВ на об'єкти [4].

Загальна схема алгоритму. Наведемо один із можливих машинних алгоритмів знаходження важливості ознак і груп ознак за допомогою функціоналу (5) і його можливе використання для вирішення широкого кола завдань із розпізнавання дискретних об'єктів.

Особливістю згаданого алгоритму є випадковий вибір ознак та груп ознак для оцінки їх інформативності і тому подібне.

Опишемо призначення деяких масивів і змінних:

N – кількість ознак;

M – кількість об'єктів у G ;

$N2$ – кількість класів;

$HB[1..N, 1..M]$ – масив для зберігання НВ у пам'яті ЕОМ;

$KOB[1..N2]$ – масив для зберігання порядкових номерів останніх об'єктів кожного класу;

$HH[1..MX]$ – масив для зберігання поліномів за модулем 2, необхідних для формування випадкових бітових рядків B , одиниці яких задають номери ознак. Для останніх надалі знаходиться їх значення за допомогою функціоналу (5);

MX – кількість поліномів (кожний поліном ступеня N задається у вигляді бітового рядку).

Масиви $GRP[1..N], KOB2[1..N2], IOB[1..M]$ – допоміжні масиви для роботи поточного алгоритму.

Змінній W надається значення груп ознак, номери яких зберігаються в масиві $GRP[1..N]$.

Опис алгоритму.

Крок 1. Ввести вихідні значення: $M, N, N2, HB[1..N, 1..M], KOB[1..N2], HH[1..MX], IJB = 0, M2 = 2 * N, N5 = 64$.

Крок 2. Формування випадкового бітового рядку $B.IJB = IJB + 1$.

Крок 3. $GRP = 0, KI = 0, IWJ = 0, N4 = 0, N3 = N5 - N + 1$.

Крок 4. $I = N3 - 1$.

Крок 5. $I = I + 1, N4 = N4 + 1$.

Крок 6. Якщо 1-ий біт рядка B дорівнює I , то $KI = KI + 1, GRP[KI] = N4$; якщо $I < N3 + N$, то перейти на Крок 5.

Крок 7. $L2 = 0$, $IOB = 0$, $I = 0$.

Крок 8. $I = I + 1$. Якщо $IOB[I] = 1$, то перейти на Крок 17.

Крок 9. $I1 = 1$, $KOB2 = 0$, $J = 0$.

Крок 10. $J = J + 1$; якщо $J = KOB[I1]$, то $I1 = I + 1$; якщо $IOB[J] = 1$, то перейти на Крок 14.

Крок 11. $K = K + 1$.

Якщо $HB[J,GRP[K]] > HB[I,GRP[K]]$, то перейти на Крок 14.

Крок 12. Якщо $K < KI$, то перейти на Крок 14.

Крок 13. $IOB[J] = 1$, $KOB[I1] = KOB2[I1] + 1$.

Крок 14. Якщо $J < M$, то перейти на Крок 10.

Крок 15. Знайти максимальне значення в масиві $KOB2$.

Крок 16. $IWJ = IWJ + IW$.

Крок 17. Якщо $I < M$, то перейти на Крок 8.

Крок 18. $W = IWJ/M$. Роздрукувати значення GRP і W .

Крок 19. Якщо $IBJ < M2$, то перейти на Крок 2.

Крок 20. Закінчити роботу

Зазначимо, що за незначної модифікації описаний алгоритм можливо використовувати для широкого кола завдань із розпізнавання об'єктів (знаходження всіх тестів у G , тестів фіксованої довжини, наперед заданої кількості тестів, деяких тестів за обмежений час, розв'язання завдань із геологічного прогнозування, визначення якості кодування інформації, знаходження ознак для розпізнавання дискретних об'єктів, вирішення деяких соціологічних завдань та інше).

Висновки. Перерахуємо тепер основні завдання, пов'язані з обробкою НВ і які можливо вирішити на основі застосування функціоналу (6), а також визначимо деякі його особливості.

Як уже зазначалося вище, на основі формули (6) запропоновано метод знаходження всіх тестів НВ (зокрема, тупикових та мінімальних).

Функціонал (6) дозволяє безпосередньо за НВ вираховувати значення ознаки (групи ознак) стосовно функції розбиття $f_R(x)$ НВ на об'єкти.

Формула (6) дозволяє легко знаходити значення ознак (або групи ознак) в будь-якому випадку (багатозначному) стосовно функції, яка задає розбиття НВ.

Формула (6) дає можливість досить легко знаходити тести (тупикові або мінімальні), а також значення окремих ознак (групи ознак) у випадку, коли НВ складається із двох і більше образів.

Чисельна величина $W(x_i, \dots, x_i)$, $(1 \leq \gamma \leq n)$, як бачимо, є частиною об'єктів НВ, які правильно розпізнаються групою ознак x_i, \dots, x_i .

У деяких випадках дуже важко (неможливо) знайти тест (наприклад, прогнозування погоди).

Очевидно, у такому разі слід спробувати знайти таку сукупність ознак, яка б дозволяла найкращим чином відрізнити одні об'єкти від інших. Указану групу ознак, на відміну від тесту, будемо називати квазітестом. Формула (6) дозволяє знаходити квазітести безпосередньо за заданою НВ.

Функціонал (6) легко узагальнити на випадок, якщо об'єкти НВ є наборами дійсних чисел, тобто складаються з нескінченних множин. У такому разі можливо ввести поняття тесту, аналогічне наведеному, а також тупикового (мінімального) тесту. Однак під ознакою тут розуміється вже не функція вибору аргументу (як тестових методів), а більш загальне функціональне перетворення об'єктів (наборів дійсних чисел) НВ.

Формула (6) дозволяє ефективно знаходити групи ознак (або одну ознаку), які розпізнають образи НВ з деякою заданою наперед точністю. Використовуючи її, можемо завжди знайти найважливішу групу ознак (стосовно функції, яка задає розбиття НВ) за їх фіксованої кількості у групі.

Якщо в НВ не існує тесту (крім тривіального, тобто такого, який містить всі ознаки), то функціонал (6) дозволяє знайти мінімальну групу ознак із максимальним значенням стосовно функції, яка задає розбиття НВ на об'єкти.

Значення ознак, а також тести (тупикові та мінімальні) за допомогою (6) знаходяться безпосередньо за НВ (тобто без додаткових перетворень НВ).

Особливо важливою якістю функціоналу (6) є те, що обчислення значення ознак (групи ознак) та знаходження тестів за (6) здійснюється одночасно, паралельно, що дозволяє виділити групу ознак, для яких $W(x_i, \dots, x_i) < 1$, як деякий квазітест, що розпізнає об'єкти НВ із фіксованою точністю, рівною W . У відомих тестових методах ці завдання (визначення значення і тестовості ознак) вирішуються послідовно, що збільшує машинний час виконання вказаних процедур.

Значення окремих ознак (групи ознак), яке розраховується за (6), як уже було сказано вище, чисельно співпадає із частиною об'єктів, що правильно розпізнаються (за допомогою ознак) – фактично це інтерпретація функціоналу (6) стосовно НВ.

На основі функціоналів (2), (4) можемо запропонувати ефективний метод (для багатьох видів НВ) знаходження всіх тупикових тестів НВ.

Функціонал (6) можливо застосовувати для знаходження контрольних та діагностичних тестів (у дискретних та аналогових пристроях) під час пошуку технічних несправностей.

Можемо навести приклади таких НВ, для яких на основі побудови всіх тупикових тестів неможливо визначити значення ознак. Функціонал (6) дозволяє це зробити.

Функціонал (6) можливо застосовувати для обробки НВ, яка складається з одного об'єкта (однієї таблиці), тобто знаходити тести (тупикові, мінімальні), визначати значення ознак стосовно рядків таблиці та інше. Наприклад, таке завдання досить часто зустрічається в геологічних дослідженнях.

Функціонал (6) можливо застосовувати до НВ, які не зведені до допустимого вигляду.

Для обчислення функціоналу (6) не обов'язково вводити НВ у пам'ять ЕОМ. Є можливість (за допомогою деяких фіксованих алгоритмів) обчислювати (2) та (4) без занесення в пам'ять машини.

Функціонал (6) має сенс також для всіх ознак x_1, \dots, x_n . Дійсно, нехай G – довільна множина, а $f_R(x)$ – деяка функція, яка задана на цій множині. Нехай x_1, \dots, x_2 є деякими ознаками, тобто функціями вигляду $G \rightarrow \{0, 1, \dots, k_i - 1\}$, $(i = 1, 2, \dots, n)$. Систему ознак x_1, \dots, x_n будемо називати повною щодо $f_R(x)$, якщо виконується така умова: якщо $f_R(x) \uparrow f_R(y)$, де $x, y \in G$, то набір ознак x_1, \dots, x_n відрізняється від набору ознак y_1, \dots, y_n . Очевидно, що величина $W(x_1, \dots, x_n)$ тоді і тільки тоді дорівнює одиниці (тобто група ознак x_1, \dots, x_n є тестом), коли група ознак x_1, \dots, x_n є повною стосовно функції f_R . Для НВ допустимого вигляду $W(x_1, \dots, x_n) = 1$.

Якщо ж група ознак x_1, \dots, x_n неповна, то величина $W(x_1, \dots, x_n)$ строго менша одиниці. Таким чином, величина $W(x_1, \dots, x_n)$ слугує оцінкою повноти групи ознак x_1, \dots, x_n стосовно функції $f_R(x)$.

На основі функціоналу (6) можливо запропонувати звичайну класифікацію НВ зі скінчених множин: для кожного n , $(n = 1, 2, \dots)$ буде лише 2^n різних типів НВ, відмінних один від одного хоч одним тупиковим тестом.

Функціонал (6) можливо застосовувати для розв'язання ігрових завдань (наприклад, гра «Морський бій»), а також для знаходження мінімальних диз'юнктивних нормальних форм, тобто для вирішення завдань, які зводяться до знаходження тупикових тестів.

На основі застосування функціоналу (6) можемо запропонувати різні алгоритми розпізнавання об'єктів, які описуються дискретними наборами x_1, \dots, x_n , $(x_i \in \{0, 1, \dots, k_i - 1\})$ (або наборами дійсних чисел).

На основі функціоналу (6) можливо знайти максимальне число тупикових тестів для кожного n . Це число буде рівне $\max(C_n^1, \dots, C_n^{n-1})$ за деяких обмежень щодо значення функціоналу (6).

Функціонал (2) можливо використовувати для вибору розташування аргументів у граф-схемах нульових та багатозначних функцій за мінімізацією.

В оцінці повноти всіх ознак x_1, \dots, x_n інтерес викликає така величина: $B(x_1, \dots, x_n) = \min_{\Delta \in Q} \delta_{\Delta}$, де $\Delta \in Q$ мають той самий сенс, що і в (6). Ця оцінка є більш жорсткою, ніж $W(x_1, \dots, x_n)$, і тому її більш доцільно застосовувати тоді, коли необхідно отримати значний ефект у розпізнаванні об'єктів $x, (x \in G)$, тобто коли потрібно максимально обмежити ризик неправильного розпізнавання.

Аналогічно функціоналу (2) можемо ввести функціонал $W(x_i) = W(x_1, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_n)$. При цьому найважливішою ознакою стосовно функції, яка задає розбиття НВ на об'єкти, вважається та ознака, для якої ця величина мінімальна.

Список літератури:

1. Повхан І.Ф. Визначення поняття ознаки в теорії розпізнавання образів. Науково технічний журнал «Штучний Інтелект». 2002. № 4. С. 512–517.
2. Повхан І.Ф. Групова та індивідуальна оцінка важливості бульових аргументів. Вісник НТУ «ХП». 2011. № 53. С. 57–64.
3. Повхан І.Ф., Василенко Ю.А., Василенко Е.Ю. Концептуальна основа систем розпізнавання образів на основі методу розгалуженого вибору ознак. European Journal of Enterprise Technologies. 2004. № 7(1). С. 13–15.
4. Повхан І.Ф., Василенко Е.Ю., Василенко Ю.А. Метод розгалуженого вибору ознак у математичному конструюванні багаторівневих систем розпізнавання образів. Штучний інтелект. 2003. № 7. С. 246–249.

ПРОБЛЕМА ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ ОБУЧАЮЩЕЙ ВЫБОРКИ В ЗАДАЧАХ РАСПОЗНАВАНИЯ ДИСКРЕТНЫХ ОБЪЕКТОВ

Статья посвящена актуальной проблеме оценки обучающей выборки на основе функционалов. Правильная оценка выборки позволяет построить эффективное правило классификации, обеспечивает простое и полное распознавание дискретных объектов.

Ключевые слова: распознавание дискретных объектов, важность аргументов, функция распознавания.

**THE PROBLEM OF FUNCTIONAL ASSESSMENT OF THE TRAINING SET
IN THE TASKS OF RECOGNITION OF DISCRETE OBJECTS**

The work is devoted to the actual problem of evaluating a training sample based on functional. The correct estimate of the sample allows you to build an effective classification rule, provides a simple and complete recognition of discrete objects.

Key words: *recognition of discrete objects, importance of arguments, recognition function.*

Портянко Т.М.

Черкаський державний технологічний університет

ПРАКТИЧНИЙ ПІДХІД ДО ФОРМУВАННЯ ВАЛІДАЦІЙНОГО МАЙСТЕР-ПЛАНУ В ПРОЦЕСІ ВАЛІДАЦІЇ КОМП'ЮТЕРИЗОВАНИХ СИСТЕМ

У статті проведено аналіз наявної нормативної документації та науково-практичних публікацій із валідації комп'ютеризованих систем. Визначено підходи, які необхідно врахувати у розробці валідаційного майстер-плану. Запропоновано структуру та зміст розділів указанного документа. Надано детальні рекомендації щодо формування розділу зі стратегії валідації та персоналу валідаційної групи.

Ключові слова: комп'ютеризована система, валідація, валідаційний майстер-план, належна виробнича практика (GMP), персонал.

Постановка проблеми. Важливою складовою частиною будь-якого виробництва в сучасному світі є комп'ютеризовані системи, які управляють виробничими процесами. Комп'ютеризована система (далі – КС) – це сукупність програмних і апаратних компонентів, які призначені для контролю за одним або декількома автоматизованими процесами і/або функціями. Вона складається з комп'ютерного і програмного забезпечення, периферійних пристроїв, компонентів організації мережі і документації, а також охоплює персонал, який взаємодіє з обладнанням і програмним забезпеченням, наприклад користувачів і фахівців із підтримки інформаційних технологій.

Людина бере безпосередню участь у виробничому процесі і перетворюється на його контролера, передаючи функції управління спеціалізованому програмному забезпеченню. Якщо на підприємстві КС замінює ручну операцію, то це не має призводити до зниження якості продукції та контролю процесу. [2, с. 215]. Саме цим зумовлена необхідність перевірки коректності роботи КС, відповідності міжнародним нормам належної виробничої практики Good Manufacturing Practice (далі – GMP), тобто проведення валідації. Термін «комп'ютерна валідація» давно набув популярності, але у багатьох фахівців із якості, відповідальних за проведення цього виду валідації на підприємстві, він асоціюється із чимось неймовірно складним, чого потрібно уникати будь-якою ціною. Бажання уникнути комп'ютерної валідації є однією з головних причин того, що у проектуванні виробництва вибираються рішення, які передбачають більш низький рівень автоматизації. Відсутність належної документації у проекті комп'ютеризованої системи істотно збільшує ризик виникнення помилок, відтак багаторазово

збільшує витрати робочого часу на їх виправлення, на внесення змін і, власне, проведення комп'ютерної валідації [10, с. 107]. Усі ці фактори роблять організацію та проведення валідаційної діяльності під час упровадження КС на вітчизняних підприємствах актуальним і важливим напрямом досліджень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останніми роками за темою валідації КС з'явилися стандарти, настанови, керівні документи, опубліковані статті, більшість із яких покладаються на стандарти Інституту інженерів електротехніки й електроніки (Institute of Electrical and Electronics Engineers – IEEE) в тій частині, яка стосується програмного забезпечення.

Основним документом, що на сьогодні є настановою під час створення комп'ютеризованих систем і проведення комп'ютерної валідації, є GAMP 5 (Good Automated Manufacturing Practice – Належна практика автоматизованого виробництва). Положення цього документа не є обов'язковими до виконання, але вони містять методологію, яка допомагає відповідати вимогам GMP. Слід також згадати два нормативні документи, що містять вимоги до КС: Додаток 11 «Комп'ютеризовані системи» до Настанови з GMP ЄС; 21CFR Частина 11 FDA США «Електронні записи; електронні підписи».

Вимоги до розроблення документа валідаційного майстер-плану містять рекомендації PIC/S (Pharmaceutical Inspection Cooperation Scheme) PI 006 «Validation Master Plan, Installation and Operational Qualification, Non-Sterile Process Validation, Cleaning Validation».

Усі згадані документи визначають загальні вимоги до персоналу, валідації та систем у разі застосування КС у GMP на виробництві. Проте

нормативні вимоги декларують, як повинно бути, а не яким чином цього досягти [1; 3; 4].

Прикладні аспекти аналізованої проблеми розглядаються переважно іноземними авторами (G.C. Wrigley, D.B. Barr, R.C. Fish, J.Y. Lee, В.В. Беляев [5; 6; 7] та інші) й деякими українськими фахівцями (Ю.В. Підпружников, О.І. Гризодуб, В.О. Лебединець, Н.А. Тахтаулова, С.В. Медушевский [8; 9; 11; 12] та інші).

Однак у іноземних та вітчизняних фахівців практично відсутні матеріали стосовно валідації КС, особливо щодо окремих локальних питань роз'яснення принципів та підходів до формування валідаційної документації під час впровадження КС, що, на погляд автора, саме і є виключно важливим моментом для практичного застосування.

Постановка завдання. Метою статті є детальне дослідження структури валідаційного майстер-плану, яку необхідно врахувати у формуванні документа та у процесі валідації КС.

Виклад основного матеріалу дослідження. Валідація КС – це досягнення і підтримка відповідності чинним стосовно неї вимогам належних практик (GxP) і придатності для запланованого використання шляхом:

- впровадження принципів, підходів і заходів життєвого циклу КС у рамках валідаційних планів і звітів;
- застосування адекватних експлуатаційних засобів контролю протягом усього життєвого циклу КС.

Життєвий цикл КС складається із чотирьох основних етапів:

- концепція;
- проект;
- експлуатація;
- завершення експлуатації [2, с. 14].

На етапі концепції компанія розглядає можливість для автоматизації одного або декількох процесів, ґрунтуючись на потребах бізнесу. На цьому етапі необхідно розробити початкові вимоги і розглянути можливі шляхи їх дотримання. Від початкового розуміння масштабів, витрат і вигод приймається рішення про перехід до етапу проекту. Етап проекту включає планування, оцінку і вибір постачальника КС, специфікацій, конфігурації, верифікації/валідації, результатом чого є введення в експлуатацію КС. Експлуатація КС є найдовшим етапом і управляється за допомогою певних процедур, що застосовуються персоналом із відповідною підготовкою, освітою і досвідом. Ключовими аспектами є підтримання контролю (в тому числі безпеки), придатності для майбутнього викорис-

тання. Заключний етап – це остаточне завершення експлуатації КС. Він включає рішення про збереження даних, їх міграцію або знищення, а також управління цими процесами.

Діяльність із проведення валідації КС слід планувати і здійснювати в певній послідовності відповідно до чинних нормативних технічних документів, визначених процедур.

На початковому етапі підготовки й організації процесу валідації КС та коректного її проведення слід скласти валідаційний майстер-план (Validation Master Plan (далі – VMP)) – документ, який описує філософію, стратегію і методологію підприємства із проведення валідації [1, с. 258]. VMP є документальною основою, яка гарантує, що будь-який механізм, процедура або функція КС буде постійно приводити до очікуваних результатів, а також підтверджує, що ця КС розроблена і функціонує з урахуванням вимог GMP, рекомендацій GAMP-5 [10, с. 109]. VMP узагальнює концепцію валідації компанії, періодичність проведення, встановлює перелік об'єктів, що підлягають валідації, календарний графік запланованих валідаційних робіт, визначає відповідальність персоналу (виконавців і учасників), вимоги до документального оформлення (застосовувані процедури й форми записів (бланки протоколів, звітів)), у ньому вказано критерії для остаточного затвердження і релізу КС.

Валідаційний майстер-план складається на підставі нормативних вимог і з урахуванням специфічних особливостей компанії. Очікуваний результат можливо досягти шляхом визначення вимог до розробленої КС, формування критеріїв прийнятності, на підставі яких буде проводитися перевірка КС на правильність розробки і повноту функціональних можливостей КС [2, с. 60].

VMP повинен створюватися для кожної регламентованої належними практиками КС, що функціонують у компанії, фокусуючись на таких аспектах, як безпека, якість продукції і цілісність даних.

Об'єкти й обсяг заходів із валідації КС, що визначені у VMP, встановлюються на підставі всебічного аналізу ризиків (критичності процесу для якості продукту), метою якого є безпека, якість продукції і цілісність даних. Ступінь деталізації у VMP повинна відображати ризик, складність, новизну КС, стандартність/нестандартність використовуваного обладнання, технологій, програмного забезпечення.

VMP складається в лаконічній, зрозумілій і читабельній формі. При цьому необхідно уникати

жаргону й опису технічних подробиць. У VMP не має дублюватися інформація, що міститься в інших документах, але повинні бути посилання на них [2, с. 61; 10, с. 109].

Аналіз літературних джерел дав змогу автору сформулювати VMP. Цей документ може містити розділи та інформацію, наведену в Таблиці 1.

Таблиця 1

Валідаційний майстер-план

№	Розділи валідаційного майстер-плану	Короткий зміст розділу
1	Вступ та галузь застосування	Вступ містить початкову частину VMP. Цей розділ включає визначення об'єкта валідації КС, основні її аспекти, а також поділяється на такі підрозділи: – область застосування КС; – валідаційні цілі проекту; – огляд, підтримка і/або процес внесення змін до VMP.
2	Огляд КС	У цьому розділі описується КС у доступній формі, простими термінами. Він включає такі підрозділи: – мета проведення валідації та заплановане використання КС; – детальний опис КС; – огляд архітектури КС.
3	Організаційна структура	Розділ включає опис ролей та відповідальність задіяних осіб, зокрема: – керівника проекту; – керівника департаменту/відділу якості; – власника проекту і/або власника КС.
4	Управління ризиками якості	У цьому розділі описується підхід, що буде застосований в управлінні ризиками якості, проведенні первинного оцінювання ризику на основі розуміння бізнес-процесів і оцінки бізнес-ризиків, вимог користувачів, нормативних вимог та функціональних областей. Результати первинної оцінки ризиків включають рішення про те, як регулюється КС GxP (тобто GxP-оцінювання), визначають етапи, на яких буде виконуватися оцінювання ризику.
5	Стратегія валідації	Розділ включає стратегію для досягнення та забезпечення відповідності призначенню на основі розгляду: – оцінки ризику (ризиків); – оцінки компонентів КС і архітектури; – оцінки постачальника. Повинні бути включені висновки із проведеного оцінювання. Стратегія валідації має описувати: – модель життєвого циклу КС; – застосування/використання обладнання і програмного забезпечення; – вхід і вихід, необхідний для кожного етапу проекту; – критерії приймання для кожного етапу; – підхід/метод простежуваності; – підхід/метод оцінки/аналізу проекту.
6	Плановані результати	У цьому розділі описуються плановані практичні результати впровадження КС.
7	Критерії приймання	Розділ містить описані критерії приймання для КС (наприклад, успішне завершення певної фази або етапу проекту). Повинен бути визначений підхід до обробки значних/важливих відхилень.
8	Контроль внесення змін	У цьому розділі визначаються вимоги для контролю над внесенням змін до проекту, зокрема посилання на відповідні процедури, указується, на якій стадії буде застосовуватися оперативний контроль змін.
9	Стандартні операційні процедури	У цьому розділі вказуються стандартні операційні процедури (СОП), які потрібно створити або вдосконалити в результаті впровадження КС, і відповідальні за їх формування, розгляд/перевірку та затвердження особи.
10	Додаткові процеси	У цьому розділі визначаються деталі важливих додаткових процесів, наприклад: – навчання (включаючи навчання проектної групи і навчання користувачів); – управління документацією.
11	Глосарій	До розділу повинні бути включені формулювання усіх термінів і аббревіатур, які можуть бути незнайомі читачеві документа.

Згідно з результатами досліджень за аналізованою темою, під час створення VMP у практичних фахівців виникають труднощі під час формування розділу «Стратегія валідації». Тож, на думку автора, інформація, що має бути надана у згаданому розділі, підлягає більш детальному поясненню. Отже, фіксуючи дані про модель життєвого циклу КС, у розділі «Стратегія валідації» слід описати структуру, що визначає послідовність виконання і взаємозв'язку процесів, дій та завдань протягом життєвого циклу КС (наприклад, каскадна, спіральна чи v-подібна модель). В описі необхідно вказати залежність КС від специфіки, масштабу і складності цього проекту щодо впровадження КС та умов, за яких вона створюється і функціонуватиме, а також відобразити різні етапи життєвого циклу КС: з моменту виникнення необхідності в ній до виведення з експлуатації.

Оскільки обсяг робіт, що проводяться під час валідації, визначається з урахуванням стандартності/нестандартності використовуваного обладнання, програмного забезпечення (далі – ПЗ), то в підрозділі, що описує ці категорії, слід вказати, наприклад: системне ПЗ, мікропрограму (ПЗ в апаратних пристроях); ПЗ, готове для використання; конфігуроване ПЗ; самостійно розроблене спеціальне ПЗ. На думку автора, важливим є той момент, що в деяких випадках окремі модулі можуть відноситись до різних категорій.

У процесі формування стратегії валідації необхідно окреслити послідовність етапів валідації

та перелік необхідної документації на початку і в кінці цих етапів, а також визначити вимоги до умов, які повинні бути виконані до приймання результатів проекту із впровадження КС.

Інформація стосовно аналізу та простежуваності проекту сприяє в гарантуванні того, що КС придатна для використання за призначенням, а також запобігає підвищенню загальної вартості проекту завдяки ранньому виявленню дефектів та вирішенню пов'язаних із ними проблем. Тож стратегія валідації має містити опис взаємозв'язку вимог відповідних специфікацій з отриманими результатами тестування, а також у зворотному напрямі – від тестування до вимог специфікацій, і, як результат, надання простежуваності для забезпечення того, що були перевірені всі наявні елементи специфікацій, включаючи першочергові вимоги.

Досить важливим елементом є демонстрація методу, завдяки якому досягнуто простежуваності. У цьому розділі слід вказати метод, яким досягається простежуваність, наприклад матриця простежуваності вимог. Невід'ємною та необхідною частиною стратегії валідації, на думку автора, є інформація про підходи/методи оцінку/аналіз проекту. Тож розділ має містити опис оцінки очікуваних результатів згідно зі стандартами і раніше встановленими вимогами, можливості виявляти проблеми і розробляти відповідні коригувальні дії. Також тут варто вказати методи оцінювання, які повинні бути заплановані для проведення на

Таблиця 2

Ролі персоналу, які беруть участь у плануванні і здійсненні заходів із валідації КС

Роль	Опис
Власник бізнес-процесу	Власник бізнес-процесу(-ів) – це особа, яка відповідає за управління бізнес-процесом (-ами). Це, як правило, керівник функціонального підрозділу або департаменту, який використовує КС. Він відповідає за те, щоб КС і її функціонал були придатні для використання за призначенням протягом необхідного строку.
Власник/керівник проекту КС	Власник проекту КС відповідає за проект розробки та впровадження, гарантує доступність, підтримку й обслуговування системи, а також гарантування безпеки даних, що містяться в цій КС, забезпечення належної підготовки для кінцевих користувачів, координації участі інших груп, прийняття відповідних заходів щодо забезпечення відповідності GxP.
Користувач КС	Користувачем КС є особа, група або відділ фахівців, які використовують цю КС. Він відповідає за проходження навчання, виконання тестових бізнес-кейсів, тестування КС на відповідність специфікації вимог користувача.
Забезпечення якості/спеціаліст із валідації	Фахівець із валідації (забезпечення якості) перевіряє всі валідаційні документи і забезпечує їх відповідність політиці якості, чинним вимогам/правилам. Він координує і контролює валідаційну діяльність та надання кінцевих результатів, щоб забезпечити їх відповідність стандартам і регуляторним вимогам для перевірки КС.
ІТ-відділ	Цей відділ несе відповідальність за створення і налаштування прав доступу до КС, навчання користувачів роботі в КС, підготовку тестових бізнес-кейсів, безпосереднє тестування КС, розгляд і узгодження протоколів із валідації, розгляд і узгодження звіту з валідації, технічне обслуговування, подальший супровід КС.

відповідних етапах життєвого циклу залежно від ризику, складності та новизни КС.

VMP повинен містити конкретні заходи на випадок будь-яких відхилень від перерахованих випробувань і терміни, після закінчення яких допускається чергова валідація. У разі, якщо виникають зміни у стратегії або в області застосування КС, слід контролювати зміну проекту і, відповідно, оновлення VMP. Будь-які модифікації устаткування, систем, технологічних процесів або порядку дій можуть зумовити зміни параметрів або вплинути на очікувані результати. VMP повинен коригуватися за результатами контролю за змінами на активному виробництві. Показники, які були визначені в період планування валідації (формування VMP), і надалі слугуватимуть критеріями прийнятності у валідації.

Щоб реалізувати на практиці завдання валідації, зазвичай на підприємстві створюють структурний підрозділ, який буде займатися організацією відповідних робіт. Для проведення валідації КС повинна бути сформована валідаційна група, всередині якої слід забезпечити чіткий розподіл функцій. Необхідно визначити, чим буде займатися кожен член групи і закріпити це документально [1, с. 215; 2, с. 61]. Особливістю роботи з валідації КС є необхідність співпраці фахівців різного профілю: спеціалістів виробництва, служби якості, валідаційної і технічної служби, IT-служби, метрологів і так далі. До валідаційних груп насамперед включаються особи, які мають необхідну кваліфікацію. При цьому варто враховувати, чи здатний фахівець виконувати роботу, яка вимагає високої концентрації уваги.

Першим завданням валідаційних груп є формування необхідних документів із валідації КС та підготовка до випробування (складання протоколів, форм, визначення методик і критеріїв прийнятності, здійснення технічної та організаційної підготовки, планування етапів валідації і так далі). Також у їх компетенції – проведення випробувань, їх документування, фіксування відхилень, змін, невиконань, невідповідностей. Нарешті, валіда-

ційні групи повинні займатися інтерпретацією результатів, їх оформленням і аналізом, підготовкою висновків і рекомендацій, складанням звіту.

Слід постійно навчати персонал, залучений до проведення валідації. Система його навчання повинна функціонувати ще до початку процесу і включати програми, протоколи, оцінку ефективності навчання, інші критерії. Навчанням також повинен закінчуватися кожен етап валідації КС.

У ряді випадків потрібне залучення зовнішніх фахівців або інших співробітників компанії, які не включені до валідаційних груп. Однак варто пам'ятати, що відповідальність за проведення валідації завжди лежить на самому підприємстві, а не на аутсорсингових фахівцях.

Автор пропонує один із можливих практичних підходів, що дозволяють прописати розподіл обов'язків у валідаційних групах. Залежно від встановленої ролі співробітники підприємства матимуть можливість виконувати різні функціональні обов'язки.

У Таблиці 2 описано ролі персоналу, які беруть участь у плануванні і здійсненні заходів із валідації КС разом із розподілом відповідних завдань і обов'язків.

Процес валідації здійснюється самим виконавцем (постачальником КС) або іншою особою, наприклад замовником КС, котрий впроваджує і проводить цей процес за планом, у якому відображені елементи і завдання перевірки.

Висновки. За допомогою валідації компанія отримує документальне свідчення того, що КС працює правильно, а це істотно знижує ризик виникнення помилок, зменшує витрати робочого часу на їх виявлення і виправлення, внесення відповідних змін. Водночас VMP є керівним принципом для персоналу під час проведення валідації. Розроблений з урахуванням наших рекомендацій VMP матиме вбудований механізм самовдосконалення, що забезпечить йому постійну оптимізацію. Заходи з поліпшення можуть стосуватись як самого планування робіт (VMP), так і задіяного персоналу, застосовуваних інструментів і технологій.

Список літератури:

1. Лікарські засоби. Належна виробнича практика: Настанова СТ-Н МОЗУ 42-4.0:2016. Дод. 11, 15. Київ, 2016. С. 335.
2. Validation master plan installation and operational qualification non-sterile process validation; Cleaning validation: PIC/S Recommendations PI 006-3. 2007. 26 p.
3. FDA Guidance for Industry. Process Validation: General Principles and Practice. URL: <http://www.fda.gov/cder/guidance/index>.
4. Wrigley G. Facility validation: theory, practice and tools. Boca Raton, Florida: CRC Press LLC, 2004. 142 p.
5. Беляев В.В. Исследование и разработка унифицированных методов валидации в производстве и контроле качества лекарственных средств: автореф. дис. ... канд. фармацевт. наук: 14.04.01. Москва, 2010. 24 с.

6. Сыбанкулова М.А., Жетерова С.К., Байзолданов Т.Б. Планирование и проведение валидации на фармацевтическом предприятии. Вестник Казахского национального университета. 2010. № 4. С. 210–213.
7. Тахтаулова Н.О., Коваленко С.М., Лебединец В.О. Організаційне забезпечення валідаційних робіт на промислових фармацевтичних підприємствах. Управління, економіка та забезпечення якості у фармації. 2009. № 2(4). Ч. 1. С. 10–15.
8. Тахтаулова Н.О. Ієрархічна структура регламентації валідаційних робіт у межах системи управління якістю фармацевтичного підприємства. Вісник фармації. 2011. № 3. С. 66–69.
9. Худзинский А.И. Простым языком о компьютерной валидации. Фармацевтические технологии и упаковка. 2010. № 5. С. 108–112.
10. Медушевський С.В., Єфіменко Н.А. Ключові елементи методики планування валідації для забезпечення та контролю якості проекту розробки та впровадження автоматизованої інформаційної системи. Nauka i Studia. Серія «Технічні науки». 2017. № 19. С. 9–12.
11. Медушевський С.В., Єфіменко Н.А. Аналіз фаз життєвого циклу автоматизованої інформаційної системи в межах виконання валідаційних робіт. Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія «Технічні роботи». 2016. № 3. С. 50–56.

ПРАКТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ФОРМИРОВАНИЮ ВАЛИДАЦИОННОГО МАСТЕР-ПЛАНА В ПРОЦЕССЕ ВАЛИДАЦИИ КОМПЬЮТЕРИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ

В статье проведен анализ существующей нормативной документации и научно-практических публикаций по валидации компьютеризированных систем. Определены подходы, которые необходимо учесть при разработке валидационного мастер-плана. Предложена структура и содержание разделов указанного документа. Приведены подробные рекомендации по формированию раздела по стратегии валидации и персонала валидационной группы.

Ключевые слова: компьютеризированная система, валидация, валидационный мастер-план, надлежащая производственная практика (GMP), персонал.

PRACTICAL APPROACH TO THE FORMATION OF THE VALIDATION MASTER PLAN IN THE PROCESS OF VALIDATION OF COMPUTERIZED SYSTEMS

The article analyzes the existing normative documentation and scientific and practical publications on the validation of computerized systems. Defined approaches that need to be taken into account when developing a validation master plan. The structure and content of the document sections are proposed. The detailed recommendations for the formation of the section on the validation strategy and validation group are given.

Key words: computerized system, validation, validation master plan, proper manufacturing practice (GMP), personnel.

Портянка Т.М.

Черкаський державний технологічний університет

Кучеренко В.С.

Черкаська медична академія

ОСОБЛИВОСТІ УПРАВЛІННЯ РИЗИКАМИ У ПРОЦЕСІ ВПРОВАДЖЕННЯ КОМП'ЮТЕРИЗОВАНИХ СИСТЕМ НА ФАРМАЦЕВТИЧНИХ ПІДПРИЄМСТВАХ

Одним з актуальних, але недостатньо розглянутих у науковій літературі питань є оцінка ризиків у процесі впровадження комп'ютеризованої системи. На основі огляду нормативних вимог запропоновано підхід до вибору методу для оцінки ризиків, що включає ідентифікацію, аналіз, оцінювання ризику. Надано пропозиції щодо розрахунку числових мір ризику. Запропоновано рекомендації стосовно вжиття запобіжних заходів за результатами аналізу ризиків.

Ключові слова: ризик, оцінка ризику, управління ризиками, комп'ютеризована система.

Постановка проблеми. Практика свідчить, що будь-яка діяльність людини є потенційно небезпечною, тобто завжди існує певний ризик. Ризик можливо уявити як поєднання ймовірності події з певними небажаними наслідками: вихід із ладу обладнання, травмування, захворювання людей, матеріальні втрати тощо. Якість діяльності організації в умовах невизначеності зовнішнього середовища, підвищення рівня конкуренції на ринку стають основними чинниками різкого зростання різного роду ризиків. У зв'язку із цим однією із ключових проблем концепції поліпшення якості організаційної та виробничої діяльності підприємств є аналіз і управління ризиками.

Управління ризиком полягає у завчасному виявленні пов'язаних із ним небезпек і вжитті заходів для зниження ризику шляхом цілеспрямованої зміни цих факторів з урахуванням ефективності вжитих заходів. Принципи управління ризиками ефективно застосовуються в багатьох галузях економічної діяльності та державного управління, включаючи фінанси, страхування, безпеку на виробництві, охорону здоров'я, а також використовуються установами, що забезпечують регуляторну діяльність у цих сферах. Ризик для якості, який, безумовно, існує протягом усього життєвого циклу будь-якої продукції – від її розробки й виробництва до реалізації та безпосереднього застосування, – набуває критичного значення стосовно фармацевтичної продукції, адже трансформується у ризик для життя і здоров'я пацієнтів [1, с. 10].

Сьогодні неможливо уявити успішну діяльність фармацевтичного підприємства без ефективного використання інформаційних технологій.

Застосування сучасної комп'ютерної техніки для комплексної автоматизації фармацевтичних підприємств дає змогу швидко знаходити оптимальні технологічні рішення за значного зниження використання ресурсів. Сучасні нормативи належної виробничої практики (GMP) однозначно вимагають постійного управління ризиками для якості у процесі впровадження комп'ютеризованих систем (далі – КС) [2, с. 215].

Реалізація програми управління ризиками для КС включає ідентифікацію всіх можливих її відмов, помилок персоналу, втрати даних, оцінку ймовірності їх настання і ступеня критичності, виходячи з можливих наслідків для споживача і, відповідно, вжиття комплексу заходів, спрямованих на усунення всіх значних ризиків. Тому і виникає завдання постійного моніторингу помилок та розробки на його основі організаційно-технічних заходів, спрямованих на дотримання вимог нормативної документації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблемі аналізу та управління ризиками в останнє десятиліття присвячено багато публікацій у вітчизняній і зарубіжній літературі. Їй приділяється велика увага як теоретиками, так і практикаками підприємницької діяльності. Загальні рекомендації щодо управління ризиками для якості взагалі і у фармацевтичній сфері зокрема наведено у ряді нормативних документів та методичних матеріалів [2, с. 215; 3, с. 7; 10 с. 76]. Прикладні аспекти порушеної проблеми досліджуються переважно іноземними авторами (В. Boedecker, I.R. Thrussell, J. Mähltitz, M.-P. Mueller, P. Sexton, S. Kawasaki тощо) і дея-

кими українськими науковцями (С.М. Кашуцьким, Ю.В. Підпружниковим, С.В. Суром, О.А. Шестопал, В.О. Лебединцем та іншими) [1, с. 10]. Ті чи інші напрацювання щодо управління ризиками мають провідні фармацевтичні підприємства України (ВАТ «Інтерхім», ЗАТ «НВЦ «Борщагівський хіміко-фармацевтичний завод», ВАТ «Фармак», корпорація «Артеріум», ЗАТ «Фармацевтична фірма «Дарниця», ТОВ «ФК «Здоров'я» та деякі інші), однак це розробки локального характеру, а матеріали про оцінку ризиків у процесі впровадження КС майже не публікуються у фахових виданнях, а відтак не доступні більшості зацікавлених фахівців.

Постановка завдання. Метою статті є вивчення вимог нормативної бази стосовно підходів до регламентації діяльності з управління ризиками у процесі впровадження комп'ютеризованих систем на фармацевтичних підприємствах, а також розробка прикладних пропозицій щодо здійснення ідентифікації, оцінювання й управління ризиками.

Виклад основного матеріалу дослідження. Відповідно до чинних вимог та рекомендацій нормативних документів [2, с. 215; 3, с. 7; 7 с. 76]

протягом життєвого циклу КС слід застосовувати управління ризиками з урахуванням безпеки пацієнта, цілісності даних і якості продукції.

Життєвий цикл КС складається із чотирьох основних етапів: концепція, проект, експлуатація, завершення експлуатації [7, с. 14].

На етапі концепції компанія розглядає можливості для автоматизації одного або декількох процесів, ґрунтуючись на потребах бізнесу. На цьому етапі необхідно розробити початкові вимоги і розглянути можливі шляхи їх дотримання. Від початкового розуміння масштабів, витрат і вигод приймається рішення про перехід до етапу проекту. Етап проекту включає планування, оцінку і вибір постачальника КС, специфікацій, конфігурації, верифікації/валідації, результатом чого є введення в експлуатацію КС. Експлуатація КС є найдовшим етапом і управляється за допомогою певних процедур, що застосовуються персоналом із відповідною підготовкою, освітою і досвідом. Ключовими аспектами є підтримання контролю (в тому числі безпеки), придатності для майбутнього використання. Заключний етап – це остаточне завершення експлуатації КС. Він включає рішення про збереження даних, їх міграцію або знищення, а також

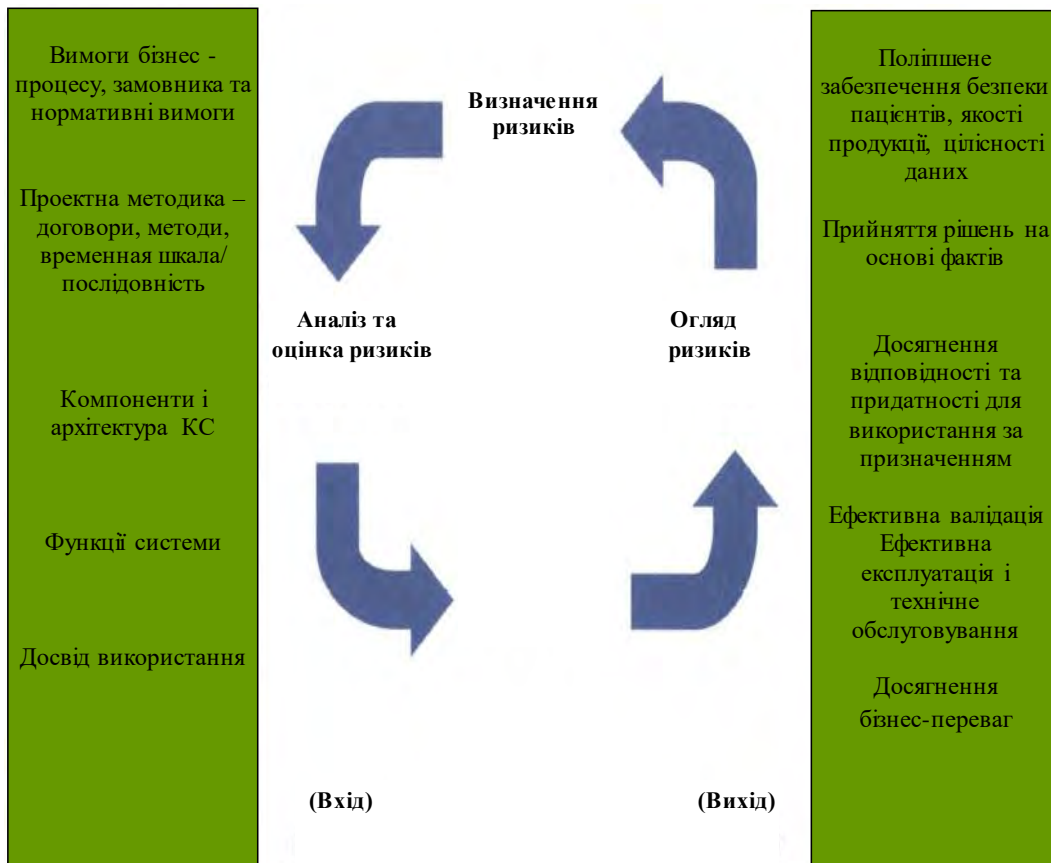


Рис. 1. Огляд та переваги управління ризиками

управління цими процесами. Проект підготовки та створення КС динамічний. Це означає, що під час його реалізації відбуваються зміни, тому необхідно, щоб аналізи ризиків проводилися на різних етапах проекту.

Визначення ризиків, пов'язаних із впровадженням КС, формує систему для управління останніми, у рамках якої розглядається реалізація (Рис. 1):

- впливу КС на гарантування безпеки пацієнтів;
- дотримання якості продукції та цілісності даних;
- підтримуваних КС бізнес-процесів;
- вимог замовника, нормативних вимог;
- вимог проектних підходів (договори, терміни);
- компонентів і архітектури КС;
- функцій КС;
- можливостей постачальника КС.

Управління ризиками досягається за рахунок:

- виключення ризиків на стадії плану/проекування КС;
- зниження ризиків до прийняттого рівня;
- верифікації етапів життєвого циклу КС для демонстрації, що ризики врегульовані до прийняттого рівня.

Діяльність із проведення оцінки ризиків КС слід планувати і реалізовувати в певній послідовності відповідно до чинних нормативних технічних документів за допомогою визначених процедур.

Аналіз ризиків КС повинен виконуватись спеціально підбраною багатофункціональною командою експертів (групою з оцінки/аналізу ризиків), яка має інформацію про стан проекту розробки та впровадження КС. Склад такої групи зумовлений важкістю та специфікою КС. Ефективність аналізу залежить від професійного рівня, практичного досвіду та узгодженості дій фахівців цієї групи [3, с. 8].

Оцінка ризику є основою для прийняття рішень із його обробки та процесом, що об'єднує ідентифікацію, аналіз та оцінювання ризику.

Оцінка ризику забезпечує розуміння можливих небезпечних подій, їх причин і наслідків, імовірності їх виникнення і прийняття рішень.

Метою ідентифікації ризику є складання переліку його джерел і подій, які можуть вплинути на досягнення кожної з поставлених цілей щодо функціонування КС чи зробити виконання цих цілей неможливим.

Мета аналізу ризиків – розглянути й оцінити ризики, пов'язані з експлуатацією КС, ідентифі-

кувати і звести до мінімуму наслідки несприятливих ситуацій. Аналіз ризику включає дослідження інформації про нього, а також аналіз джерел небезпечних подій, їх позитивних і негативних наслідків та ймовірностей появи цих подій. При цьому повинні бути ідентифіковані фактори, що впливають на ймовірність події та наслідки. У деяких випадках наслідок може бути результатом реалізації кількох подій або неідентифікованої події. У такому разі оцінку ризику слід зосередити на аналізі значущості й уразливості компонентів досліджуваної КС. Вплив може мати невеликі наслідки, але високу ймовірність появи або значущі наслідки і низьку ймовірність появи, а також будь-який проміжний варіант.

Під час здійснення порівняльного оцінювання ризику необхідно використовувати інформацію про нього, отриману в результаті аналізу ризику. Результати порівняльної оцінки останнього потрібно використовувати для прийняття рішень про майбутні дії.

Аналізуючи наслідки, визначають характер і тип впливу, що може статися у разі виникнення конкретної події або ситуації. Аналіз наслідків може змінюватися від простого опису результатів до детального кількісного моделювання ситуації, процесів і аналізу вразливостей.

Характер прийнятих рішень і їхні критерії повинні бути раніше встановлені під час визначення сфери застосування КС, однак на кожному етапі оцінки ризиків вони повинні бути повторно і більш детально розглянуті з погляду вже отриманих даних про ідентифіковані небезпеки та ризик.

Залишкові ризики слід розглядати після впровадження заходів контролю, наприклад після тестування, для визначення корекції стратегії контролю КС. Якщо залишковий ризик вищий від порога прийняттого рівня ризику, то відповідні елементи контролю необхідно провести і перевірити, а також потрібно розглянути вплив на раніше вжиті заходи контролю ризиків.

Настанова СТ-Н МОЗУ 42-4.2:2011 «Лікарські засоби. Управління ризиками для якості» (ICH Q9) представляє основні приклади інструментів, які можуть бути використані для управління ризиками якості. На вибір методу оцінки ризику впливають різні фактори, такі як доступність ресурсів, характер і ступінь невизначеності даних та інформації, складність методу [3, с. 12; 7, с. 35].

Методи, які використовуються для аналізу ризику, можуть бути якісними, кількісними або змішаними. Одним із методів, що застосовується для оцінки ризиків у процесі впровадження КС,

Таблиця 1

Класифікація рівнів тяжкості відхилень (V)

Вплив	Бальна оцінка	Опис
Критичний	3	Відхилення, які можуть призвести до значного ризику для безпеки пацієнтів, цілісності даних і якості продукції. Такі відхилення забороняють виконання подальших дій із тестування і вимагають розроблення та проведення коригувальних дій
Серйозний	2	Відхилення, які вказують на неможливість використання системи за призначенням, однак вони не перешкоджають виконанню подальших дій у процесі тестування. Зазначене вимагає розробки плану коригувальних дій
Незначний	1	Відхилення, які не можуть бути класифіковані як критичні або серйозні. Їх виникнення не обов'язково впливає на якість продукту, але може впливати або впливає опосередковано. Такі відхилення не перешкоджають виконанню подальших дій у процесі тестування, але вимагають розробки плану коригувальних дій

Таблиця 2

Імовірність виникнення відхилення (P), критерії оцінки

Виявлення	Бальна оцінка	Імовірність виявлення, %	Критерії
Малоймовірно	1	до 10	Відхилення виникає рідко
Можливо	2	11–50	Існує ймовірність виникнення відхилення
Часто	3	від 51	Відхилення виникає часто

Таблиця 3

Імовірність виявлення відхилення (K), критерії оцінки

Виявлення	Бальна оцінка	Імовірність виявлення, %	Критерії
Високе	1	до 10	Ступінь імовірності виявлення відхилення високий
Середнє	2	11–50	Ступінь імовірності виявлення відхилення середній
Низьке	3	від 51	Малоймовірно виявити можливе відхилення

є аналіз характеру наслідків відмов (Failure Mode Effects Analysis (далі – FMEA)). Цей метод дозволяє вивчити ступінь тяжкості наслідків відносно ймовірності виникнення відхилень. За допомогою FMEA можливо виявити моменти, які є найбільш потенційно небезпечними та розробити відповідні рішення для вибору дій з обробки ризику, що дозволить знизити його до прийнятного рівня [6, с. 19, 41; 4, с. 76]. У поєднанні з FMEA для підвищення точності і повноти ідентифікації ризику, його можливих причин можуть бути використані різні допоміжні методи, наприклад метод мозкового штурму і причинно-наслідковий аналіз (діаграма Ісікави) [3, с. 14].

Під час проведення оцінювання кожен невідповідність або небезпечну ситуацію слід класифікувати за трьома критеріями: рівень тяжкості відхилення (значимість), імовірність виникнення відхилення, імовірність виявлення відхилення до настання небажаної події. Кількісні та якісні оцінки тяжкості відхилення, виникнення і виявлення потенційних невідповідностей або їх причин необхідно визначати на основі статистичних

даних або думок експертів проектної групи за допомогою відповідних типових шкал (таблиці 1, 2, 3, 4). Вони повинні розглядатися в контексті КС у кожному проекті.

Рівень ризику (MR) розраховується за допомогою формули:

$$MR=V \times P \times K,$$

де MR – рівень ризику;

V – наслідки відхилення;

P – імовірність виникнення відхилення;

K – імовірність виявлення відхилення.

Таблиця 4

Рівень ризику

Оцінка	Опис	Виділення кольором
1–2	Низький рівень, прийнятний.	Низький
3–17	Середній рівень, прийнятність слід аналізувати.	Середній
18–27	Високий рівень ризику, неприйнятний або прийнятий свідомо.	Високий

Первинну (початкову) оцінку ризиків слід проводити під час (або до) початку проектування КС на основі розуміння бізнес-процесів і оцінки бізнес-ризиків, вимог користувачів, нормативних вимог. Бажано усунути ризик, якщо можливо, шляхом зміни/модифікування проектування процесів і КС [7, с. 36].

Оцінка ризиків може бути виконана з різним ступенем глибини і деталізації, з використанням одного або декількох методів різного рівня складності. Форма оцінки та її вихідні дані повинні бути сумісними із критеріями ризику, встановленими за визначення сфери застосування.

На основі згаданої попередньої оцінки ризику, можливо, не потрібно буде виконувати подальші кроки процесу, а рівень ризику може бути вже на прийнятному рівні.

Переваги попереднього оцінювання ризиків включають: раннє виявлення ключових областей, які вимагають уваги на подальших етапах, інформацію для розробки вимог і опису КС, інформацію для надання допомоги в розробці стратегії для досягнення відповідності та придатності для планованого використання.

Під час подальшого розгляду можливих небезпек слід оцінити функції КС, що впливають на безпеку пацієнтів, якість продукції, цілісність даних, а також те, як управляти потенційним збитком, що є результатом цих небезпек. У процесі функціонального оцінювання ризиків може з'явитися необхідність провести більш детальну оцінку, яка аналізує подальшу тяжкість шкоди, ймовірність виникнення і виявлення. Відповідні елементи управління слід визначити на основі отриманої оцінки.

Для ефективного підходу до управління ризиками потрібно враховувати категорію програмних і апаратних засобів [5, с. 10].

У процесі експлуатаційного оцінювання ризиків слід розглянути можливі ризики, пов'язані з роботою КС, і відповідності її встановленим раніше вимогам під час використання за призначенням.

Процес оцінювання ризику необхідно задокументувати разом із його результатами. Ризик повинен бути виражений у зрозумілих і точних термінах та одиницях. Необхідний ступінь звітності залежить від цілей і області визначення оцінки. Якщо оцінка ризику проводиться в рамках безперервного процесу ризик-менеджменту, то її слід реєструвати способом, що дозволяє використовувати її результати на всіх етапах життєвого циклу КС.

Управління змінами є критичною діяльністю, яка має принципове значення для підтримки сумісного стану КС і бізнес-процесів. Усі зміни, запропоновані/проведені на експлуатаційному етапі життєвого циклу КС, повинні бути предметом процесу управління змінами. Останнє має забезпечити надійний механізм для оперативного здійснення технічно надійних виправлень, враховуючи підходи, зазначені в документах проектування КС, специфікаціях, періодичному моніторингу. Обсяг документації та перевірки слід засновувати на оцінці ризиків і складності змін.

Ризик-обґрунтовані рішення є обов'язковими у плануванні вилучення КС з обігу (активного користування). Потрібно оцінити, наприклад: підхід до збереження даних і записів; переміщення/міграції даних і записів; відновлення даних і записів за необхідності.

Оцінку ризиків необхідно актуалізувати відповідно до отримання нової інформації, зміни області застосування аналізу ризику і потреб процесу менеджменту.

Управління ризиками КС має бути частиною активного процесу управління якістю на фармацевтичному підприємстві. Потрібно ввести механізм огляду або моніторингу подій. Моніторинг та управління ризиками – це процес ідентифікації, аналізу та планування реагування на нові ризики, відстеження раніше ідентифікованих ризиків, а також перевірки та виконання операцій реагування на ризики й оцінка ефективності цих операцій. Результати процесу управління ризиками слід переглядати з урахуванням нових знань і досвіду. Частота будь-якого огляду має ґрунтуватися на рівні ризику.

Висновки. Результатом процесу управління ризиками може стати як дія, так і інформація, отримана на будь-якій стадії життєвого циклу КС, залежно від поставленої мети. У процесі управління ризиками та вживання коригувальних і запобіжних заходів, а також у разі внесення змін до КС можуть бути введені нові ризики або змінитися наявні. Тому слід проводити перегляд оцінки ризиків після вчинення таких кроків, а також розробляти план дій на випадок, якщо той чи інший ризик реалізується.

Описаний у статті алгоритм управління ризиками дозволяє сфокусувати всі зусилля на основних аспектах КС контрольованим, правомірним та обґрунтованим способом, що приводить до конкретних вигод, таких як: виявлення та управління ризиками для безпеки пацієнтів, якості продукції і цілісності даних, обґрунтування використання

документації постачальника КС, кращого розуміння потенційних ризиків і пропонування елементів управління, поліпшення розуміння бізнес-процесів.

Тема оцінки, аналізу та управління ризиками, аспекти забезпечення якості у процесі впрова-

дження та експлуатації комп'ютеризованих систем є актуальною не тільки для фармацевтичних виробників, відтак переконливі в науковому та практичному сенсі напрацювання є завжди необхідними.

Список літератури:

1. Лебеденць В.О., Коваленко С.М. Оцінювання, аналізування та управління ризиками для якості на фармацевтичному підприємстві. Управління, економіка та забезпечення якості в фармації. 2011. № 6(20). С. 10–15.
2. СТ-Н МОЗУ 42-4.0:2016. Лікарські засоби. Належна виробнича практика. Київ, 2016. 358 с.
3. СТ-Н МОЗУ 42-4.2:2011 (ІСН Q9). Лікарські засоби. Управління ризиками для якості. Київ, 2011. 36 с.
4. Тихоненко В.В., Тихоненко Т.В. Управление рисками качества, экологическими и профессиональными рисками в фармацевтике. Управління якістю у фармації: матер. наук.-практ. конференції (Харків, 27 травня 2011 р.). Харків, 2011. С. 76–77.
5. Фабрис Ж. Валідація комп'ютеризованих систем у контексті GMP. Аптека. 2012. № 30(851). С. 10–11.
6. IEC 60812. Analysis Techniques for system reliability. Procedures for failure mode and effects analysis (FMEA). International Electrotechnical Commission (IEC). 2006. 93 p.
7. GAMP 5. Good Automated Manufacturing Practice. International Society for Pharmaceutical Engineering. 2011. 196 p.
8. ISO 31000:2009. Risk management. Principles and guidelines. International Organization for Standardization. 2010. 24 p.

ОСОБЕННОСТИ УПРАВЛЕНИЯ РИСКАМИ ПРИ ВНЕДРЕНИИ КОМПЬЮТЕРИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ НА ФАРМАЦЕВТИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

Одним из актуальных, но недостаточно рассмотренных в научной литературе вопросов является оценка рисков при внедрении компьютеризированной системы. На основе обзора нормативных требований предложен подход к выбору метода для оценки рисков, включая идентификацию, анализ, оценка риска. Представлены предложения по расчету числовых мер риска. Предложены рекомендации по принятию мер по результатам анализа рисков.

Ключевые слова: *риск, оценка риска, управление рисками, компьютеризированная система.*

FEATURES OF RISK MANAGEMENT IN IMPLEMENTATION OF COMPUTERIZED SYSTEM AT PHARMACEUTICAL ENTERPRISES

One of the urgent, but not sufficiently considered in the scientific literature, is the assessment of risks in the implementation of the computerized system. Based on the review of regulatory requirements, an approach to selecting a method for risk assessment, which includes identification, analysis, risk assessment, is proposed. Suggested suggestions for calculating numeric risk measures. Recommendations for taking preventive measures based on the results of risk analysis are given.

Key words: *risk, risk assessment, risk management, computerized system.*

Відомості про авторів

- Андрощук Г.В.** – магістр Одеського національного політехнічного університету;
- Беглов К.В.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних систем автоматизації Одеського національного політехнічного університету;
- Білюк І.С.** – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри автоматики Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова;
- Біряк В.В.** – магістр Одеського національного політехнічного університету;
- Бланар П.Г.** – студент магістр Одеського національного політехнічного університету;
- Бойко О.В.** – магістр Одеського національного політехнічного університету;
- Бородкін Г.О.** – старший викладач кафедри комп'ютерних наук Національного університету біоресурсів і природокористування України;
- Бородкіна І.Л.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних наук Київського національного університету культури і мистецтв;
- Бугрім Л.І.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматики Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова;
- Венжега В.І.** – кандидат технічних наук, доцент Чернігівського національного технологічного університету;
- Вербицький В.Г.** – доктор фізико-математичних наук, професор Запорізької державної інженерної академії;
- Власюк А.П.** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри економіко-математичного моделювання та інформаційних технологій Національного університету «Острозька академія»;
- Вовк І.В.** – студент Одеського національного політехнічного університету;
- Водка О.О.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри динаміки та міцності машин Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»;
- Гаврилов С.О.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматики Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова;
- Голубєва С.М.** – старший викладач кафедри електричної інженерії Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля;
- Гуйда О.Г.** – доцент кафедри загальноінженерних дисциплін та теплоенергетики Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;
- Давидов В.О.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних систем автоматизації Одеського національного політехнічного університету;
- Данова К.В.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри охорони праці та безпеки життєдіяльності Харківського національного університету міського господарства імені О.М. Бекетова;
- Джамбо Е.Е.** – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри механіко-морської інженерії, Найджа Дельта Університет, Нігерія;
- Дмитришин С.С.** – магістр Одеського національного політехнічного університету;
- Дуба І.Е.** – студент Одеського національного політехнічного університету;
- Дубко В.О.** – доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри автоматизованого управління технологічними процесами Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;
- Дьяков С.О.** – асистент кафедри технічної кібернетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;
- Єнчев С.В.** – кандидат технічних наук, доцент, заступник директора Навчально-наукового аерокосмічного інституту Національного авіаційного університету;
- Єрмаков І.О.** – магістр Одеського національного політехнічного університету;
- Жуковська Н.А.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри прикладної математики Національного університету водного господарства та природокористування;
- Жуковський В.В.** – старший викладач кафедри прикладної математики Національного університету водного господарства та природокористування;
- Жученко О.А.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації хімічних виробництв Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

Качур Н.В. – молодший науковий співробітник відділу фізико-технологічних основ сенсорного матеріалознавства Інституту фізики напівпровідників імені В.Є. Лашкарьова НАН України;

Кириленко М.В. – магістр кафедри комп'ютерних систем автоматизації Одеського національного політехнічного університету;

Киричек Г.Г. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних систем та мереж Запорізького національного технічного університету;

Кириченко О.С. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри теоретичної електротехніки і електронних систем Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова;

Кисельова Н.І. – магістр кафедри комп'ютерних систем автоматизації Одеського національного політехнічного університету;

Климчук В.О. – бакалавр кафедри технічної кібернетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

Коваленко М.А. – кандидат технічних наук, доцент кафедри електромеханіки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

Конущасва Т.В. – студент Одеського національного політехнічного університету;

Корнага Я.І. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технічної кібернетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

Кучеренко В.С. – кандидат фармацевтичних наук, викладач Черкаської медичної академії;

Лавінський Д.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри теоретичної механіки Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»;

Ларін В.Ю. – доктор технічних наук, професор кафедри аеронавігаційних систем Національного авіаційного університету України;

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

Ложечников В.Ф. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних систем автоматизації Одеського національного політехнічного університету;

Ложечникова Н.В. – аспірант кафедри теплових електричних станцій та енергозберігаючих технологій Одеського національного політехнічного університету;

Ломовий В.І. – аспірант кафедри морського радіозв'язку Національного університету «Одеська морська академія»;

Лютенко Ю.М. – магістр Одеського національного політехнічного університету;

Львов Г.І. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри динаміки та міцності машин Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»;

Маляр І.В. – студент Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

Мартиненко В.Г. – кандидат технічних наук, асистент кафедри динаміки та міцності машин Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»;

Маслов В.П. – доктор технічних наук, професор, заслужений винахідник, керівник відділу фізико-технологічних основ сенсорного матеріалознавства Інституту фізики напівпровідників імені В.Є. Лашкарьова НАН України

Мастикаш О.В. – асистент кафедри соціальних комунікацій та інформаційної діяльності Національного університету «Львівська політехніка»;

Морачковський О.К. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри теоретичної механіки Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» (м. Харків);

Морнева М.О. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електричної інженерії Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля;

Муренко В.В. – бакалавр кафедри технічної кібернетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

Новіков В.І. – старший викладач кафедри телекомунікаційних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

Олалі М.О. – кандидат технічних наук, доцент кафедри механіко-морської інженерії, Найджа Дельта Університет, Нігерія;

Олалі Н.В. – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри вищої математики та інформатики, Найджа Дельта Університет, Нігерія;

Орукарі М. – кандидат технічних наук, доцент кафедри вищої математики та інформатики, Найджа Дельта Університет, Нігерія;

Павленко В.Д. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри комп'ютеризованих систем управління Одеського національного політехнічного університету;

Панаріна О.Д. – студентка інженерно-фізичного інституту Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»;

Пасска М.С. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інженерії програмного забезпечення Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу;

Пелих С.Н. – професор, старший науковий співробітник кафедри комп'ютерних технологій автоматизації Одеського національного політехнічного університету;

Пелих С.В. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри комп'ютерних систем автоматизації Одеського національного політехнічного університету;

Петрова В.М. – старший викладач кафедри телекомунікацій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

Петросян А.А. – студент Одеського національного політехнічного університету;

Повхан І.Ф. – кандидат технічних наук, доцент кафедри програмного забезпечення систем ДВНЗ «Ужгородський національний університет»;

Погребний Я.С. – магістр кафедри комп'ютерних технологій автоматизації Одеського національного політехнічного університету;

Поліщук М.М. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технічної кібернетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

Полякова Н.П. – кандидат технічних наук, доцент Запорізької державної інженерної академії;

Портянко Т.М. – кандидат технічних наук, доцент кафедри безпеки життєдіяльності Черкаського державного технологічного університету;

Рудик А.В. – кандидат технічних наук Чернігівського національного технологічного університету;

Рудьковський О.Р. – магістр факультету комп'ютерних наук та технологій Запорізького національного технічного університету;

Таку С.О. – викладач коледжу інформаційних технологій та управління Національного авіаційного університету;

Татієвський Д.М. – аспірант Запорізької державної інженерної академії;

Тимошенко В.С. – магістр факультету комп'ютерних наук та технологій Запорізького національного технічного університету;

Торопов А.С. – викладач кафедри електричної інженерії Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля;

Уліцька О.О. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних систем автоматизації Одеського національного політехнічного університету;

Фоменко А.М. – доцент кафедри автоматизації Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова;

Хібеба М.Г. – аспірант кафедри автоматизації хімічних виробництв Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

Шарейко Д.Ю. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова;

Шендера І.М. – магістр з прикладної математики Національного університету водного господарства та природокористування;

Щербань А.П. – асистент кафедри інформаційно-вимірювальної техніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

НОТАТКИ

Науковий журнал

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

Серія: Технічні науки

Том 29 (68) № 6 2018

Частина 1

Коректура • *Н. Пирог*

Комп'ютерна верстка • *Н. Кузнєцова*

Адреса редакції:

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

м. Київ, вул. Івана Кудрі, 33

Електронна пошта: editor@tech.vernadskyjournals.in.ua

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

Формат 60x84/8. Гарнітура Times New Roman.

Папір офсетний. Цифровий друк. Обл.-вид. арк. 20,21. Ум.-друк. арк. 28.6. Зам. № 0119/02

Підписано до друку 28.12.2018. Наклад 150 прим.

Видавництво і друкарня – Видавничий дім «Гельветика»

73034, м. Херсон, вул. Паровозна, 46-а, офіс 105

Телефон +38 (0552) 39 95 80

E-mail: mailbox@helvetica.com.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

ДК № 4392 від 20.08.2012 р.