

**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) № 3 2018

Частина 2

**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 № 10 від 12.06.2018 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

ІНФОРМАТИКА, ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ

Степанець О.В., Піргач В.Є.

ІНТЕГРАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЇ Z-WAVE В ІНФОРМАЦІЙНИЙ ПРОСТІР ПРОМИСЛОВОЇ
АВТОМАТИЗАЦІЇ ЗА ДОПОМОГОЮ OPC UA..... 1

Tarakhtii O.S., Nesterovich S.A.

COMPARATIVE ANALYSIS OF MODERN SYSTEMS FOR AUTOMATION OF THE MIXING AREA
OF THE COMPONENTS OF THE ELCTROPHORAPHORE..... 8

Терещенко Т.О., Ямненко Ю.С., Мельниченко О.Л., Панченко М.В.

ВЕЙВЛЕТ-ПЕРЕТВОРЕННЯ ДЛЯ ФІЛЬТРАЦІЇ ЗОБРАЖЕНЬ
ІЗ ВІДЕОКАМЕР СПОСТЕРЕЖЕННЯ..... 14

Ткаченко В.В., Беглов К.В., Улицкая Е.О.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ПАРОГЕНЕРАТОРЕ ПГВ-1000..... 19

Фомін О.О.

МОДЕЛЬНО ОРІЄНТОВАНА ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ДІАГНОСТУВАННЯ НДС
В УМОВАХ НЕПОВНОЇ АПРІОРНОЇ ІНФОРМАЦІЇ..... 24

Чернов М.Ю., Харабет А.Н.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПРОЦЕССА УПРАВЛЕНИЯ УДАЛЕНИЕМ КИСЛОРОДА
В ДЕАЭРАТОРЕ АТОМНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ..... 30

Шмельов Ю.М., Владов С.І., Хебда А.С., Котляров К.Г.

ЗАСТОСУВАННЯ ПРАВИЛ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ В ЗАДАЧІ ІДЕНТИФІКАЦІЇ
ТЕХНІЧНОГО СТАНУ АВІАЦІЙНОГО ДВИГУНА ТВ3-117..... 34

Юськів А.С., Харабет О.М.

ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ВВЕДЕННЯМ У ЦЕМЕНТНУ ПІЧ ДОДАТКОВОГО
ПАЛИВА, ВИРОБЛЕНОГО З ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ ЯК ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОГО
Й ЕКОЛОГІЧНОГО ЗАСОБУ ОДНОЧАСНО..... 41

Яременко В.С.

ОГЛЯД НАЯВНИХ МУЛЬТИАГЕНТНИХ СИСТЕМ
ДЛЯ ЗАДАЧ ИНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗУ ДАНИХ..... 47

ЕНЕРГЕТИКА

Азаров С.І., Сидоренко В.Л., Задунай О.С.

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ТЕПЛОМАСООБМІНУ
В СХОВИЩІ ВІДПРАЦЬОВАНОГО ЯДЕРНОГО ПАЛИВА..... 56

Алтухова Т.В., Скрипник С.А.

СОЗДАНИЕ ИННОВАЦИОННОЙ МОДЕЛИ СОЛНЕЧНО-ВЕТРОВОГО
ВОЗДУШНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ... 61

Васюченко П.В., Кирисов И.Г., Чернюк А.М.

ОСОБЕННОСТИ ВНЕДРЕНИЯ МЕРОПРИЯТИЙ ПО СНИЖЕНИЮ ПОТЕРЬ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ УКРАИНЫ..... 66

Канюк Г.И., Мезеря А.Ю., Мельников В.Е.

НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ И НОРМАТИВНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭНЕРГОЭФЕКТИВНЫХ
РЕЖИМОВ РАБОТЫ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ
ГИДРОГЕНЕРАТОРНЫХ УСТАНОВОК..... 71

Крот О.П.

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ СМІТТЄСПАЛЮВАЛЬНИХ УСТАНОВОК
ЗА РЕКОМЕНДАЦІЯМИ ДИРЕКТИВИ ЄВРОПЕЙСЬКОГО СОЮЗУ..... 78

РОЗРОБКА КОРИСНИХ КОПАЛИН

Василишин В.Я.

МЕТОД ДЛЯ РОЗРАХУНКУ НОРМАЛЬНИХ НАПРУЖЕНЬ ВТОМНОЇ ДОВГОВІЧНОСТІ
НАСОСНО-КОМПРЕСОРНИХ ТРУБ ЗА УМОВИ
ЇХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ У КРИВОЛІНІЙНИХ ДІЛЯНКАХ СВЕРДЛОВИН..... 83

Жуков С.О., Азарян В.А.

РОЗВИТОК ТЕОРІЇ УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ РУДОПОТОКІВ ЗАЛІЗОРУДНИХ
ГІРНИЧО-ЗБАГАЧУВАЛЬНИХ КОМБІНАТІВ..... 89

Кобылянский Б.Б., Мнухин А.Г.

АНАЛИЗ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФАКТИЧЕСКОГО УРОВНЯ БЕЗОПАСНОСТИ УГОЛЬНЫХ ШАХТ,
ОПАСНЫХ ПО ГАЗУ ИЛИ ПЫЛИ, С УЧЕТОМ ДЕЙСТВИЙ ПЕРСОНАЛА,
СОСТОЯНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ И СРЕДЫ..... 95

Kosenko A.V.

INCREASE OF EFFICIENCY OF TECHNOLOGICAL PROCESS
OF ORE DRAWING AND DELIVERY OF ORE MASS AT DEVELOPMENT OF DEPOSITS
OF NATURAL-RICH IRON ORES ON LARGE DEPTHS.....101

Мнухін А.Г., Мнухіна Н.О., Гігуляр А.А.

ПРИСТРІЙ ВПЛИВУ НА ПОРИСТЕ СЕРЕДОВИЩЕ ПОРОДНИХ ВІДВАЛІВ.....106

Слободянюк В.К., Слободянюк Р.В.

АНАЛИЗ И РАЗРАБОТКА СХЕМ КАРЬЕРНЫХ НАКЛОННЫХ
ПОДЪЕМНЫХ УСТАНОВОК.....110

МЕТАЛУРГІЯ

Курпе О.Г., Кухар В.В.

РОЗШИРЕННЯ СОРТАМЕНТУ ЛИСТОВОГО ПРОКАТУ
В УМОВАХ МЕТАЛУРГІЙНОГО ЗАВОДУ В ІТАЛІЇ.....121

ХІМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Золотарьова О.В.

ФІЗИКО-ХІМІЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕРОБКИ
ФІЛЬТРОВОЇ РІДИНИ СОДОВОГО ВИРОБНИЦТВА.....127

Колосов А.Е.

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ СОЗДАНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ КОНСТРУКЦИОННОГО НАЗНАЧЕНИЯ.....132

ТЕХНОЛОГІЯ ХАРЧОВОЇ ТА ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

Бендерська О.В., Бессараб О.С.

ДЕЯКІ АСПЕКТИ ВИКОРИСТАННЯ ВТОРИННОЇ ТОМАТНОЇ СИРОВИНИ
В ТЕХНОЛОГІЯХ ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ.....137

Гринченко Н.Г., Пивоваров П.П., Ботштейн Б.Б.

ТЕХНОЛОГІЯ ПРОДУКТУ КАПСУЛЬОВАНОГО НА ОСНОВІ СИРОВАТКИ МОЛОЧНОЇ..... 143

Сагайдак М.Є., Бліщ Р.О., Прибильський В.Л.

ВИКОРИСТАННЯ СУХИХ ПРЕПАРАТІВ МОЛОЧНОКИСЛИХ БАКТЕРІЙ
ДЛЯ ЗБРОДЖУВАННЯ КВАСНОГО СУСЛА.....150

Чаплин Д.О.

ПЕРСПЕКТИВИ РОЗРОБЛЕННЯ М'ЯСНИХ НАПІВФАБРИКАТІВ
НА ОСНОВІ СУБПРОДУКТІВ.....154

ТРАНСПОРТ

Красулин А.С., Линник Г.А.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБСЛУЖИВАНИЯ ТРАНСПОРТНО-ГРУЗОВОГО
КОМПЛЕКСА ПРОКАТНОГО ЦЕХА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО КОМБИНАТА.....158

Малахов А.В., Колгаев М.А., Бражник И.Д.

МЕТОД ПРИНУДИТЕЛЬНОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ ТРЮМОВ НА ТАНКЕРАХ.....166

БУДІВНИЦТВО

Арсеньєва Н.О.

ОСОБЛИВОСТІ РОЗРАХУНКУ АСФАЛЬТОБЕТОННИХ ШАРІВ
НА ЗСУВ У ПРОЕКТУВАННІ НЕЖОРСТКИХ ДОРОЖНІХ ОДЯГІВ..... 170

Туровська Г.І., Богданенко О.В.

АНАЛІЗ БЕЗПЕКИ ТА НАДІЙНОСТІ ЕЛЕМЕНТІВ ТЕХНІЧНОЇ СИСТЕМИ.....176

ЕЛЕКТРОНІКА

Михайленко И.В., Орлов А.Т., Сердега Б.К.

ИНТЕГРАЛЬНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ДАВЛЕНИЯ
НА ОСНОВЕ ЭФФЕКТА ПОПЕРЕЧНОЙ ТЕНЗОЭДС.....181

Удовиченко Є.С., Попов А.О., Чайковський І.А.

МЕТОД КЛАСИФІКАЦІЇ КАРТ РОЗПОДІЛУ ГУСТИНИ СТРУМУ
В МІОКАРДІ, ЗАСНОВАНИЙ НА КОРЕЛЯЦІЙНОМУ АНАЛІЗІ..... 189

CONTENTS

INFORMATICS, COMPUTER ENGINEERING AND AUTOMATION

Stepanets O.V., Pirhach V.Ye.

INTEGRATION OF Z-WAVE TECHNOLOGY IN THE INFORMATION SPACE
OF INDUSTRIAL AUTOMATION WITH OPC UA1

Tarakhtii O.S., Nesterovich S.A.

COMPARATIVE ANALYSIS OF MODERN SYSTEMS FOR AUTOMATION OF THE MIXING AREA
OF THE COMPONENTS OF THE ELCTROPHORAPHORE8

Tereshchenko T.O., Yamnenko Yu.S., Melnychenko O.L., Panchenko M.V.

WAVELET TRANSFORM FOR IMAGE FILTERING FROM SURVEILLANCE CAMERAS14

Tkachenko V.V., Beglov K.V., Ulitskaya Yu.O.

MODELING OF HEAT EXCHANGE PROCESSES IN THE STEAM GENERATOR SGV-1000.....19

Fomin O.O.

MODEL ORIENTED INFORMATION TECHNOLOGY OF DIAGNOSTICATION
OF VAT IN THE CONDITIONS OF APRILINE INFORMATION INFRASTRUCTURE.....24

Chernov M.Yu., Kharabet A.N.

STUDY OF THE DYNAMICS OF THE CONTROL PROCESS OF REMOVAL
OF OXYGEN IN THE DEAERATOR NUCLEAR POWER STATION.....30

Shmelov Yu.M., Vladov S.I., Khebda A.S., Kotliarov K.H.

APPLICATION OF THE RULES OF URBAN LOGIC IN THE PROBLEM
OF IDENTIFICATION OF THE TECHNICAL STATE OF THE AVIATION ENGINE TV3-11734

Yuskiv A.S., Kharabet O.M.

INVESTIGATION OF THE CONTROL SYSTEM OF THE INTRODUCTION TO CEMENT
FURNACE OF ADDITIONAL FUEL PRODUCED FROM DOMESTIC WASTE,
HOW ENERGY-EFFICIENT AND ENVIRONMENTAL RESOURCE SIMULTANEOUSLY41

Yaremenko V.S.

AN OVERVIEW OF EXISTING MULTI-AGENT SYSTEMS
FOR DATA MINING PROBLEM SOLVING.....47

POWER ENGINEERING

Azarov S.I., Sydorenko V.L., Zadunai O.S.

SIMULATION OF THE HEAT MASSTRANSFER PROCESSES
AT A STORAGE FOR SPENT NUCLEAR FUEL56

Altukhova T.V., Skripnik S.A.

CREATION OF THE INNOVATIVE MODEL OF THE SUNNY-WIND
AIR COMPLEX FOR ENERGY SUPPLY OF INDUSTRIAL ENTERPRISES61

Vasyuchenko P.V., Kirisov I.G., Chernyuk A.M.

FEATURES OF INTRODUCTION OF ACTIONS ON DECREASE
OF ELECTRIC ENERGY LOSSES AT INDUSTRIAL ENTERPRISES OF UKRAINE66

Kanyuk G.I., Mezerya A.Yu., Mel'nikov V.Ye.

SCIENTIFIC SUBSTANTIATION AND NORMATIVE SUPPORT
OF ENERGY EFFICIENT OPERATING MODES OF AUTOMATIC
REGULATION SYSTEMS OF HYDROGENERATOR UNITS71

Krot O.P.

ENERGY EFFICIENCY OF WASTE INCINERATION ON THE RECOMMENDATION
OF THE EUROPEAN UNION DIRECTIVE78

RESOURCE DEVELOPMENT

Vasylyshyn V.Ya.

METHOD FOR CALCULATION OF NORMAL STRESSES OF FATIGUE LIFE
OF PUMP-COMPRESSOR PIPES DURING THEIR OPERATION
IN CURVILINEAR SECTIONS OF WELLS83

Zhukov S.O., Azaryan V.A.

DEVELOPMENT OF THEORY OF MANAGING THE QUALITY
OF OUTPUTS OF IRON ORE PROCESSING PLANTS89

Kobylyanskiy B.B., Mnukhin A.G.

ANALYSIS AND DETERMINATION OF THE ACTUAL SAFETY OF COAL MINES,
DANGEROUS FOR GAS OR POWDER, WITH ACCOUNT OF PERSONNEL,
EQUIPMENT AND ENVIRONMENT95

Kosenko A.V.

INCREASE OF EFFICIENCY OF TECHNOLOGICAL PROCESS
OF ORE DRAWING AND DELIVERY OF ORE MASS AT DEVELOPMENT OF DEPOSITS
OF NATURAL-RICH IRON ORES ON LARGE DEPTHS101

Mnukhin A.H., Mnukhina N.O., Hituliar A.A.

THE DEVICE FOR IMPACT ON THE POROUS MEDIUM BREED DUMPS106

Slobodyanyuk V.K., Slobodyanyuk R.V.

ANALYSIS AND DEVELOPMENT OF SLOPE HOISTING SYSTEMS FOR OPEN PIT MINES110

METALLURGY

Kurpe O.H., Kukhar V.V.

ENHANCEMENT OF THE FLAT PRODUCTS MIX
AT THE METALLURGICAL PLANT IN ITALY121

CHEMICAL TECHNOLOGY

Zolotarova O.V.

PHYSICO-CHEMICAL STUDY ON PROCESSING
THE FILTERED LIQUID OF SODA PRODUCTION127

Koloso A.Ye.

SOME ASPECTS OF THE CREATION OF FUNCTIONAL
POLYMER COMPOSITE MATERIALS OF STRUCTURAL APPLICATION132

TECHNOLOGY OF FOOD PROCESSING AND CONSUMER GOODS INDUSTRY

Benderska O.V., Bessarab O.S.

SOME ASPECTS OF SECONDARY TOMATO RAW MATERIAL IN FOOD TECHNOLOGY137

Hrynchenko N.H., Pyvovarov P.P., Botshtein B.B.

TECHNOLOGY OF THE PRODUCT ENCAPSULATED ON THE BASIS OF THE MILK WHEY143

Sahaidak M.Ye., Blishch R.O., Prybylskyi V.L.

USE OF DRY PREPARATIONS OF LACTIC ACID BACTERIA
IN THE FERMENTATION OF KVASS WORT150

Chapliun D.O.

PROSPECTS OF DEVELOPMENT OF HALF-FINISHED MEAT
ON THE BASIS OF THE OFFAL154

TRANSPORT

Krasulin A.S., Linnik G.A.

MAINTENANCE EFFICIENCY IMPROVING OF TRANSPORT AND CARGO COMPLEX
OF ROLLING SHOP OF THE METALLURGICAL ENTERPRISE.....158

Malakhov A.V., Kolegaev M.A., Brazhnik I.D.

METHOD OF ARTIFICIAL VENTILATION FOR TANKER'S HOLDS.....166

CONSTRUCTION

Arsenieva N.O.

FEATURES OF CALCULATION OF ASPHALT CONCRETE LAYERS
ON SHEAR AND FLEXIBLE PAVEMENTS DESIGN170

Turovska H.I., Bohdanenko O.V.

SAFETY AND RELIABILITY ANALYSIS OF THE ELEMENTS OF A TECHNICAL SYSTEM.....176

ELECTRONICS

Mikhaylenko I.V., Orlov A.T., Serdega B.K.

INTEGRATED SILICON PRESSURE TRANSDUCER BASED ON TENSO-EMF EFFECT181

Udovychenko Ye.Ye., Popov A.O., Chaikovskiy I.A.

METHOD OF CURRENT DENSITY DISTRIBUTION MAPS
CLASSIFICATION BASED ON CORRELATION ANALYSIS.....189

ІНФОРМАТИКА, ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ

УДК 681.5.013

Степанець О.В.

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

Піргач В.Є.

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

ІНТЕГРАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЇ Z-WAVE В ІНФОРМАЦІЙНИЙ ПРОСТІР ПРОМИСЛОВОЇ АВТОМАТИЗАЦІЇ ЗА ДОПОМОГОЮ OPC UA

У статті розглядаються передумови, процедура та перспективи реалізації OPC UA-сервера для інтеграції протоколу Z-Wave в інформаційний простір за концепцією Industry 4.0. Проведено аналіз функціональних можливостей апаратних пристроїв технології Z-Wave та спеціалізованого програмного забезпечення. Описана послідовність створення OPC UA-сервера та налаштування програмного середовища на апаратній платформі Raspberry Pi. Продемонстрована можлива сфера застосування запропонованого рішення в автоматизації інженерних систем інтелектуальних будівель.

Ключові слова: Industry 4.0, Z-Wave, OPC UA, автоматизація інтелектуальних будівель, Raspberry Pi.

Постановка проблеми. Industry 4.0 потребує гнучкості, адаптивності, прозорості тощо, які мають бути виконані компонентами або системами Industry 4.0 [1, с. 802]. Головною проблемою, яку порушують Industry 4.0 та Industrial Internet of Things (IIoT), є безпечний стандартизований обмін даними й інформацією між пристроями, машинами та сервісами різних галузей промисловості. Еталонна модель архітектури для Industry 4.0 рекомендує тільки стандарт IEC-62541 – уніфіковану архітектуру OPC (OPC UA) для реалізації комунікаційного шару. Тому будь-який продукт, який рекламується як “Industry 4.0-enabled”, має бути сумісним з OPC UA [2, с. 297].

OPC UA – це нове покоління технології OPC. OPC UA – більш безпечний, відкритий, надійний механізм передачі інформації між серверами та клієнтами. Він гарантує безпеку та більш повну інформаційну модель, ніж оригінальний OPC, OPC Classic [3, с. 635]. OPC UA забезпечує дуже гнучкий і адаптивний механізм передачі даних між системами корпоративного типу та контроле-

рами, датчиками та приладами, які взаємодіють із реальними даними.

На відміну від уніфікованої архітектури, OPC Classic є досить обмеженим і не відповідає сучасним вимогам щодо передачі даних між системами, що контролюють реальні процеси, які генерують та контролюють живі дані. До таких обмежень належать:

1. Залежність платформи від “Microsoft”. OPC Classic побудована на основі DCOM (Distribution COM) – старої комунікаційної технології, яку підтримує лише компанія “Microsoft”.

2. Недостатня кількість моделей даних. OPC Classic не має можливості адекватно відображати типи даних, інформацію та взаємозв’язки між елементами системи;

3. Microsoft і DCOM не мають такого рівня безпеки, яка потрібна у світі з вірусними загрозами та шкідливими програмами.

Важливою задачею є пошук та реалізація інформаційних технологій, що позбавлені цих недоліків і забезпечують ефективну взаємодію

між компонентами та користувачами, зокрема, міжмашинну взаємодію окремих керуючих пристроїв різних автоматичних систем.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Протокол Z-Wave був розроблений для квартир і невеликих будинків. Зазвичай такі системи містять від 5 до 100 пристроїв. Протокол розроблявся спеціально для управління такими приладами, як світильники, жалюзі, ворота, термостати тощо, шляхом передачі коротких команд, які потребують невеликого енергоспоживання [4, с. 24]. Типові завдання, які вирішуються за допомогою Z-Wave, – це встановлення прохідних вимикачів, перенесення вимикачів на більш зручний рівень, дистанційне керування воротами і жалюзі, вмикання світла за датчиком руху. Всі ці завдання не потребують переключення проводів.

Протокол Z-Wave має різні типи вузлів, які виконують різні задачі.

Портативний контролер (Portable Controller) – прилад, що зберігає інформацію про сусідів всіх вузлів мережі (топологію мережі) і здатний на базі цієї інформації знайти маршрут до будь-якого вузла мережі. Крім того, він може переміщатися в мережі і здатен зв'язатися з усіма вузлами мережі з будь-якої її точки. До приладів даного типу не можна звернутися, тому що вони не фігурують в таблиці маршрутизації (будучи портативними) – вони можуть тільки відповідати на запит. Можливе застосування: пульт дистанційного керування. Такому приладу потрібна незалежна пам'ять EEPROM.

Статичний контролер (Static Controller) – аналогічний портативному, але він не переміщається в просторі і має бути завжди доступним іншим учасникам мережі. Типове застосування: контролер ПК. Такому приладу потрібна незалежна пам'ять EEPROM.

Дочірній пристрій (Slave) – здатний тільки відповідати на запити, тому що він не знає топології мережі і не зберігає жодних маршрутів. Такі прилади можуть бути тільки датчиками, що живляться від мережі й опитуються іншими вузлами або виконавцями. Вони не вміють ініціювати відправку даних самостійно. Таких приладів вже не виробляють, але на ринку вони ще залишилися.

Дочірній маршрутизуючий пристрій (Routing Slave) – здатний зберігати до 4 маршрутів для 5 вузлів (так звані «зворотні маршрути»). Ці пристрої можуть ініціювати відправку даних (відправляти непрошені пакети – *unsolicited packets*), а також можуть бути сплячими або такими, що «часто слухають». Типове застосування: датчики,

нерухомі пульти управління (датчик руху, кнопка вмикання на батарейках).

Комплексний дочірній маршрутизуючий пристрій (Routing Enhanced Slave). Схожий на дочірній маршрутизуючий пристрій, але зберігає маршрути до всіх вузлів мережі, а не тільки до 5. Такому приладу потрібна незалежна пам'ять EEPROM.

Більшість вузлів знає маршрути до деяких вузлів через своїх сусідів. Повні списки сусідів всіх вузлів зберігаються на контролерах. Це означає, що після переміщення пристроїв мережі в просторі маршрути, що не працюють, автоматично виправляються за першої необхідності.

Контролери (як статичні, так і портативні) можуть мати різні ролі в мережі.

Первинний контролер – координатор мережі. Це єдиний вузол, здатний включити в мережу нові вузли і виключити наявні. Він же зберігає актуальну інформацію про топології мережі і може оновлювати списки сусідів для всіх інших (вторинних) контролерів. формувати маршрути в усіх дочірніх вузлах. Первинний контролер може бути тільки один у мережі. Зазвичай первинним є той контролер, з якого почалася побудова мережі. Однак надалі первинний контролер може включити в мережу новий контролер, передавши йому свою роль.

Вторинними контролерами називаються всі інші контролери в мережі. Для нормальної роботи їм треба періодично запитувати інформацію про топології мережі (сусідів кожного вузла) у первинного контролера.

Є складні проекти автоматизації будинків, які не поступаються складністю промисловим системам автоматизації. Такі рішення потребують стандартизації передачі даних і підпадають під основні принципи Industrie 4.0, які, у свою чергу, передбачають використання стандарту OPC UA для комунікаційного шару.

Постає необхідність вибору апаратної платформи для розміщення на ній OPC UA-сервера. Raspberry Pi [5, с. 2008] є серією невеликих одноплатних комп'ютерів, розроблених Raspberry Pi Foundation як бюджетна система для навчання інформатиці, що згодом набула набагато ширшого застосування в багатьох сферах промисловості, зокрема автоматизації. Оскільки, крім стандартних, притаманних комп'ютеру інтерфейсів, Raspberry Pi має GPIO-інтерфейс для підключення зовнішніх приладів, це розширює сферу застосування Raspberry Pi в системах автоматизації.

Сьогодні програмні продукти дозволяють перетворити цей мікро-комп'ютер на повноцінний

програмно-логічний контролер (далі – ПЛК). Так, за допомогою Codesys та Control для Raspberry Pi можна створити дешеву альтернативу дорогим ПЛК, звичайно, з деякими обмеженнями у функціональності та надійності.

Отже, GPIO-інтерфейс дає можливість підключення плати розширення RaZberry, яка перетворює дешевий міні-комп'ютер Raspberry Pi на Z-Wave-контролер для автоматизації.

RaZberry – це плата із трансивером Z-Wave (рис. 1), програмне забезпечення Z-Way та інше.

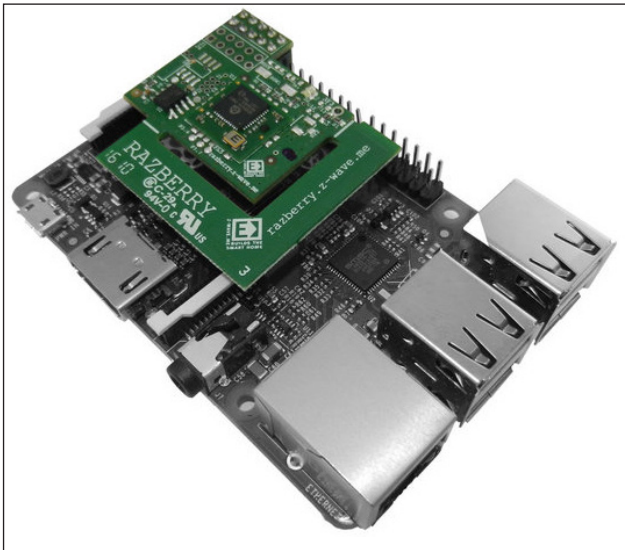


Рис. 1. Плата із трансивером Z-Wave для GPIO інтерфейсу Raspberry Pi

Для з'єднання радіомодуля Z-Wave з мікрокомп'ютером Raspberry Pi використовується програмне забезпечення, що зазвичай використовує специфічний прикладний програмний інтерфейс (API). Тому актуальною є задача написання OPC UA-сервера для уніфікації та стандартизації використання інтерфейсів зовнішніми системами.

Постановка завдання. Для розроблення способу інтеграції Z-Wave з OPC UA потрібно вирішити такі задачі:

1. Визначити доступні методи та функціональні можливості інформаційної інтеграції Z-Wave з іншими технологіями з урахуванням особливостей доступних апаратних платформ.

2. Розробити процедуру налаштування програмно-апаратного середовища для взаємодії з OPC UA.

3. Розробити OPC UA-сервер для протоколу Z-Wave, дослідити його роботу.

Виклад основного матеріалу дослідження. Z-Way встановлюється поверх операційної системи Raspbian шляхом запуску команди: `wget -q -O- razberry.z-wave.me/install | sudo bash`.

Скрипт установки встановить ПЗ Z-Way в `/opt/z-way-server`, запише в `/etc/init.d/Z-Way` скрипт для запуску, додасть його в автозапуск і налаштує порт `ttyAMA0`. Після перезавантаження сервер буде готовий до роботи. Після цього в браузері є можливість відкрити веб-додаток за адресою `IP_OF_RASPBERRY:8083` і будувати мережу Z-Wave.

Програмне забезпечення Z-Way складається з декількох частин:

1. Бібліотеки `libzway` – основи Z-Wave, що надає C API для простої роботи із Z-Wave.

2. Бібліотеки `libzwayjs` – створює зв'язок між C та JavaScript рушієм Google V8. Надає просте JS API для роботи з мережею Z-Wave.

3. Бібліотеки `libzwayhttp` – HTTP-сервісу для обслуговування зовнішніх клієнтів, зокрема призначених для користувача інтерфейсів.

Така структура дозволяє використовувати різні рівні інтеграції зі складовими частинами Z-Way. Для проектів, де важлива продуктивність, доступний API рівня C, для проектів, де потрібна оперативна розробка, простіше використовувати JS API. Важливо, що обидва інтерфейси мають подібну структуру, що дозволяє просто перенести код із JavaScript на C після швидкого прототипування.

Для реалізації OPC UA-сервера на базі мікрокомп'ютера Raspberry Pi обрано Node.js – платформу з відкритим кодом для виконання високопродуктивних мережових запитів, написаних мовою JavaScript. Функції платформи не обмежені створенням серверних скриптів для веб, платформа може використовуватися і для створення звичайних клієнтських і серверних мережових програм. Для забезпечення виконання JavaScript-коду використовується розроблений компанією “Google” рушієм V8.

Для реалізації функцій OPC UA засобами Node.js була використана бібліотека `NodeOPCUA` [6], що надає прикладний програмний інтерфейс для повної взаємодії із засобами OPC UA.

Специфікація OPC UA передбачає так звану модель адресного простору. Основна мета адресного простору OPC UA полягає в тому, щоб забезпечити стандартний спосіб для серверів представляти об'єкти для клієнтів. Об'єктна модель OPC UA розроблена для досягнення цієї мети. Вона визначає об'єкти за змінними та методами. Така структура також дозволяє створювати взаємодію з іншими об'єктами. Проста модель адресного простору, подібна до класичного OPC Data Access (DA), може бути побудована за допомогою об'єктів папок та змінних. Але наявність розширених об'єктно-орієнтованих функцій полегшує

представлення об'єктно-орієнтованих систем з OPC UA.

Елементи такої моделі представлені в адресному просторі як вузли. Кожен вузол належить до класу, наприклад, об'єкт, змінна і метод, і являє собою окремий вузол об'єктної моделі (рис. 2).

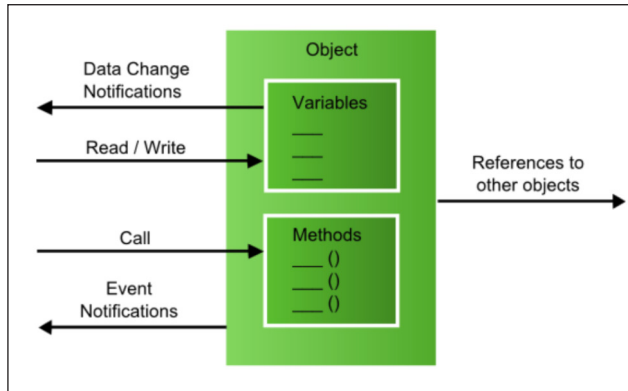


Рис. 2. Об'єкт адресного простору OPC UA-сервера

Спершу, для представлення у вигляді об'єктної моделі пристроїв Z-Wave, їх потрібно отримати. Програмне забезпечення Z-Wave [7, с. 117] дозволяє взаємодіяти з контролером за допомогою звичайних HTTP-запитів, які надають відповідь у форматі JavaScript Object Notation (JSON), що одразу дозволяє перетворити дані на звичайний JavaScript-об'єкт. Отже, для отримання списку пристроїв потрібно зробити HTTP-запит на адресу `IP_OF_RASPBERRY:8083/ZAutomation/api/v1/devices`. Після отримання даних зі списком пристроїв Z-Wave їх можна передати до OPC UA-сервера. Кожен пристрій – це змінна в адресному просторі сервера, що містить ім'я, тип

даних, значення вимірюваного параметра, одиницю вимірювання, опис, історичні дані тощо.

Під час зчитування даних змінної OPC UA клієнтом OPC UA-сервер робить запит на сервер, що взаємодіє із Z-Wave-пристроями й отримує поточне значення того чи іншого пристрою й оновлює значення змінної OPC UA-сервера. Аналогічні операції виконуються для запису змінної. Наприклад, щоб додати аналогову змінну до адресного простору OPC UA-сервера, необхідно викликати метод `addAnalogDataItem`, що належить об'єкту `addressSpace`, який, своєю чергою, належить об'єкту створеного OPC UA-сервера. Виклик методу `addAnalogDataItem` відбувається з передачею йому необхідних аргументів, а саме об'єкта з такими властивостями:

- *componentOf* – посилання на вузол, в якому перебуває змінна;
- *browseName* – ім'я змінної;
- *dataType* – тип даних змінної (повний список типів даних можна переглянути в об'єкті `DataTypes` бібліотеки `NodeOPCUA`);
- *description* – опис змінної, що додається;
- *engineeringUnits* – одиниці вимірювання змінної (повний список одиниць вимірювання можна переглянути в об'єкті `standardUnits` бібліотеки `NodeOPCUA`);
- *accessLevel* – рівень доступу, що показує можливість використання змінної, тобто зчитування, запис або зчитування та запис;
- *value* – власне значення змінної.

Властивість *value* має керований доступ, для цього використовуються спеціальні функції `get` та `set`, тобто для отримання значення та запису зна-

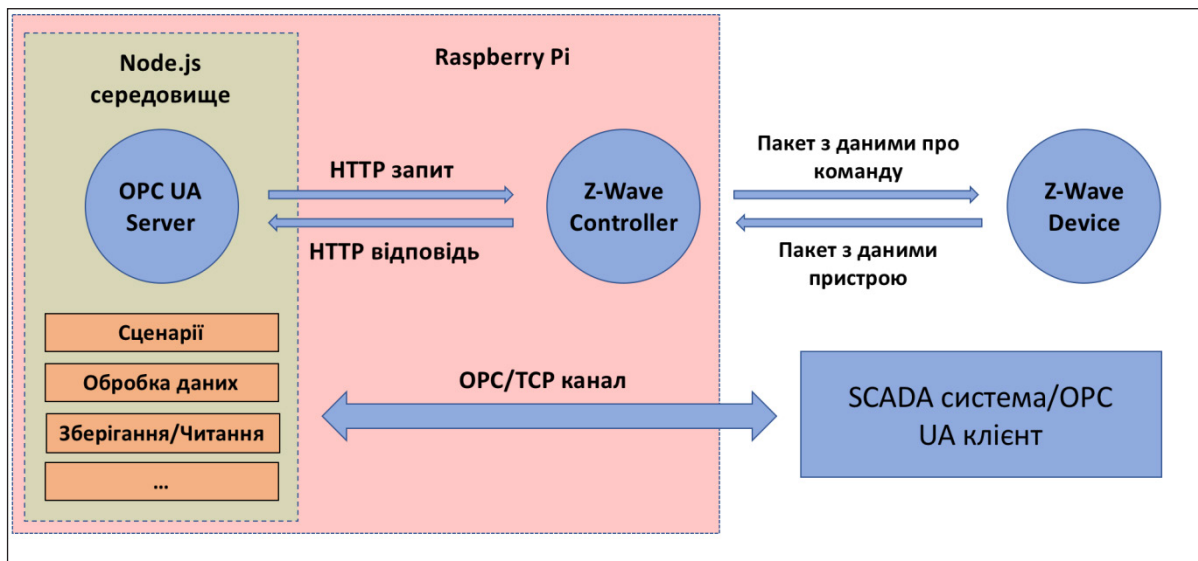


Рис. 3. Структура запитів між OPC UA-сервером, Z-Wave-контролером та OPC UA-клієнтом

чення потрібно використовувати спеціалізовані функції. Так, для отримання поточного значення того чи іншого пристрою необхідно виконати HTTP-запит, який у відповідь поверне всю необхідну інформацію про пристрій. Також для запису

значення змінної необхідно виконати HTTP-запит і в тілі запиту надіслати необхідне для запису значення. Загальна структура запитів показана на рис. 3.

Для тестування роботи OPC UA-сервера обрано програмне забезпечення Prosys OPC UA Client для операційної системи Mac OS. Список пристроїв для взаємодії показаний на рис. 4.

Також є можливість отримання історичних даних, тобто даних, які записувалися в пам'ять протягом певного часу.

Підписка на оновлення тестової змінної, яка генерує синусоїдальний сигнал, показана на рис. 5.

Специфіка Z-Wave-пристроїв така, що команди ставлять у чергу на відправку відповідних пакетів [7, с. 164]. Відправлення здійснюється через Sigma Designs Serial API, реалізовану на платі розширення RaZberry. Весь функціонал Z-Wave прихований під цим рівнем абстракції: для пристроїв на батареях ці пакети позначаються як такі, що очікують пробудження, тобто деякі пристрої можуть бути в так званому «сплячому» режимі. Для шифрування йде попередній обмін ключем, для економії заряду батарей та часу в ефірі деякі пакети об'єднуються в один. Як і в будь-якому іншому протоколі, у Z-Wave багато функціонала [8, с. 3], який знаходяться під закритим API Z-Wave.

Також засобами методів об'єктної моделі адресного простору сервера є можливість надіслати подібні команди для Z-Wave-пристроїв з OPC UA-клієнта. Тобто, викликаючи метод об'єкта OPC UA [9, с. 210], можна викликати ланцюг

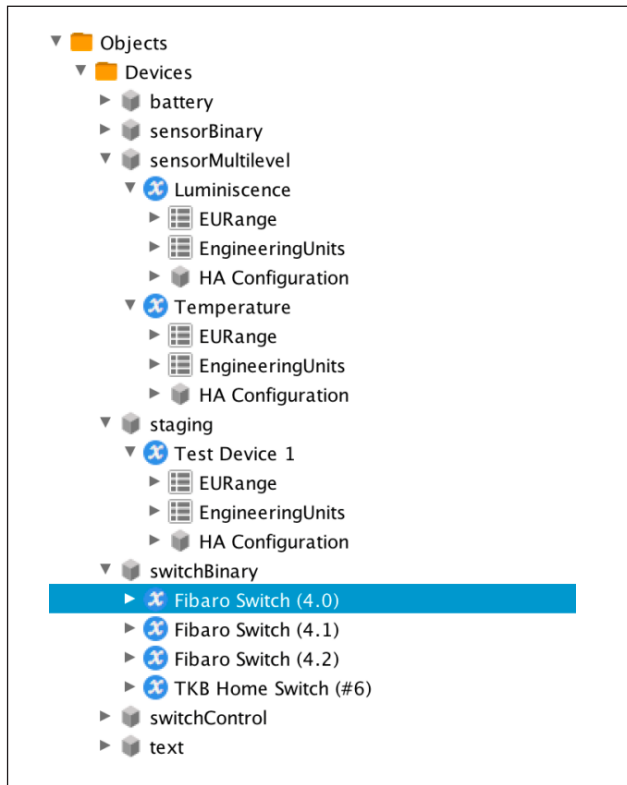


Рис. 4. Список пристроїв Z-Wave, представлений в OPC UA-клієнті

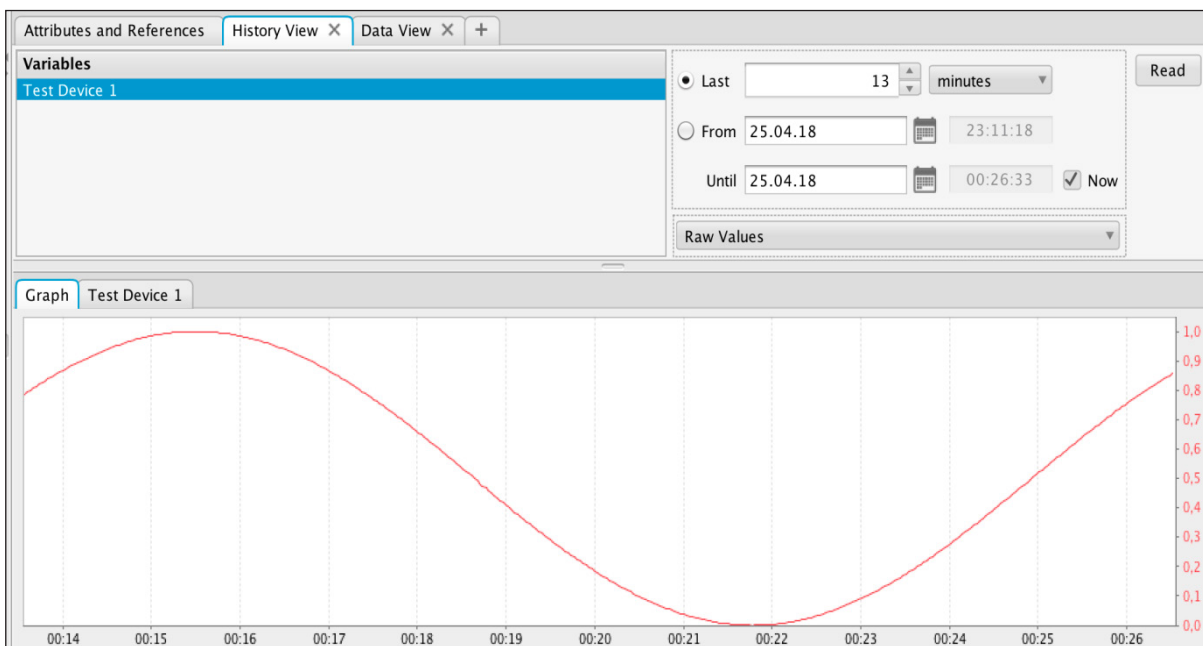


Рис. 5. Історичні дані значень тестової змінної



Рис. 6. Приклад інтерфейсу myScada для управління Z-Wave-пристроями за допомогою специфікації OPC UA

інших методів, які безпосередньо взаємодіють із Z-Wave-пристроями.

Наприклад, для домашньої автоматизації можливе використання SCADA-системи з веб-інтерфейсом mySCADA [10], що дає можливість авторизованого доступу до системи з будь-якої точки планети через інтернет. Програмне забезпечення myDESIGNER дозволяє проектувати зручні інтерфейси для контролю й управління пристроями розумного будинку з комунікаційним шаром OPC UA (рис. 6).

Висновки. Досліджено способи взаємодії пристроїв із технологією зв'язку Z-Wave та іншими системами автоматизації. Засобами JavaScript створений OPC UA-сервер на базі

мікро-комп'ютера Raspberry Pi, який взаємодіє із Z-Wave-пристроями через HTTP-запити специфічної структури і виконує роль інформаційного шлюзу між Z-Wave та іншими учасниками інформаційного простору системи автоматичного керування об'єктом. Описана процедура налаштування програмного середовища та розроблення OPC UA-сервера. Наведені приклади роботи сервера в тестовому режимі та з підключенням промислової SCADA як клієнта демонструють широкі можливості впровадження таких рішень. Така зв'язка дає можливість використовувати будь-яку SCADA-систему з підтримкою специфікації OPC UA для малої автоматизації, де всі пристрої мають безпроводний інтерфейс.

Список літератури:

1. Schleipen M., Lüder A., Sauer O., Flatt H., Jasperneite J. Requirements and concept for Plug-and-Work. Adaptivity in the context of Industry 4.0. *Automatisierungstechnik*. 2015. Vol. 63. Issue 10. P. 801–820. DOI: 10.1515/auto-2015-0015.
2. Henssen R., Schleipen M. Interoperability between OPC UA and Automation ML. *Disruptive Innovation in Manufacturing Engineering towards the 4th Industrial Revolution*. Procedia CIRP. 2014. Volume 25. P. 297–304. DOI:10.1016/j.procir.2014.10.042.
3. Schleipen M., Sauer O., Wang J. Semantic integration by means of a graphical OPC Unified Architecture (OPC UA) information model designer for Manufacturing Execution Systems. 43rd CIRP International Conference on Manufacturing Systems, 26–28 May 2010. Vienna. P. 633–640.
4. Paetz C. *Z-Wave Basics: Remote Control in Smart Homes*. 2015. 300 p.
5. Shete R., Agrawal S. IoT based urban climate monitoring using raspberry pi. *Communication and Signal Processing (ICCSP)*. 2016, P. 2008–2012.
6. Build OPC UA applications in JavaScript and NodeJS. URL: <http://node-opcua.github.io> (дата звернення: 22.05.2018).

7. Hall J., Ramsey B., Rice M., Lacey T. Z-Wave network reconnaissance and transceiver fingerprinting using software-defined radios. International conference on cyber warfare and security. 2016, P. 163–171.
8. Fouladi B., Ghanoun S. Security evaluation of the Z-Wave wireless protocol / Presented at Blackhat, Fouladi, Ghanoun, 2013. USA. URL: http://neominds.org/download/zwave_wp.pdf (дата звернення: 22.05.2018).
9. Rohjans S., Piech K., Lehnhoff S. UML-based modeling of OPC UA address spaces for power systems: IEEE International Workshop on Intelligent Energy Systems. 2013. P. 209–214.
10. mySCADA Technologies – Professional HMI/SCADA Solution. URL: <https://www.myscada.org> (дата звернення: 22.05.2018).

ИНТЕГРАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ Z-WAVE В ИНФОРМАЦИОННОЕ ПРОСТРАНСТВО ПРОМЫШЛЕННОЙ АВТОМАТИЗАЦИИ С ПОМОЩЬЮ OPC UA

В статье рассматриваются предпосылки, процедура и перспективы реализации OPC UA-сервера для интеграции протокола Z-Wave в информационное пространство по концепции Industry 4.0. Проведен анализ функциональных возможностей аппаратных устройств технологии Z-Wave и специализированного программного обеспечения. Описаны последовательность создания OPC UA-сервера и настройка программной среды на аппаратной платформе Raspberry Pi. Продемонстрирована возможная сфера применения предлагаемого решения в автоматизации инженерных систем интеллектуальных зданий.

Ключевые слова: Industry 4.0, Z-Wave, OPC UA, автоматизация интеллектуальных зданий, Raspberry Pi.

INTEGRATION OF Z-WAVE TECHNOLOGY IN THE INFORMATION SPACE OF INDUSTRIAL AUTOMATION WITH OPC UA

The article discusses the preconditions, procedure and prospects for the implementation of the OPC UA server for integration of the Z-Wave protocol into the information space under the Industry 4.0 concept. The analysis of functional possibilities of Z-Wave hardware devices and specialized software was carried out. Describes the process of creating the OPC UA server and configuring the software environment on the Raspberry Pi hardware platform. The possible application of the proposed solution in the automation of engineering systems of intellectual buildings is demonstrated.

Key words: Industry 4.0, Z-Wave, OPC UA, Intelligent Buildings Automation, Raspberry Pi.

UDC 621.039.56

Tarakhtii O.S.

Odessa National Polytechnic University

Nesterovich S.A.

Odessa National Polytechnic University

COMPARATIVE ANALYSIS OF MODERN SYSTEMS FOR AUTOMATION OF THE MIXING AREA OF THE COMPONENTS OF THE ELECTROPHOROPHORE

The comparative analysis of modern systems for automation of the mixing area of the components of electrical porcelain is carried out in the article. Possible constructions of aggregates and methods of work for implementation of this process are represented. Also management methods are reviewed and a new structure of management system is proposed. The aim is to study modern methods for assessing the quality of mixing bulk materials in the production of electrical porcelain, as well as alternative approaches to designing of automated control systems for the mixing process in a drum mixer.

Key words: automatic control system, electrotechnical porcelain, quality criterion, optical method, concentrate of key components, mixing of bulk materials.

Introduction. Different wares made of electrical porcelain are needed in manufacturing as well as for providing electricity to enterprises and people. Electrical porcelain is a silicate material based on natural raw materials. Since Ukraine has substantial reserves of raw materials, the production of electrical porcelain is beneficial and in-demand. The basic components of electrical porcelain are: kaolin, clay, quartz, feldspar, gypsum, pegmatite, zircon. High requirements for electrical porcelain cause using for its production only pure and stable in the composition ceramic raw materials. Threaded conductors for textile machines from dense glazed porcelain reliably work with carbon fiber, kevlar and aramid fibers. The chemical resistance of porcelain makes it an indispensable material for chemical engineering. Another scope of application of porcelain is furniture and sanitary industry, door handles, water fittings and buttons. In addition: cartridges and sockets for the lighting industry, cartridges for high-voltage insulators, tubes TRF from special high-strength porcelain, insulators for power and electrical engineering, as well as for electrothermia, terminal blocks and more. Since the electrical porcelain production technology is insufficiently automated, multi-stage and energy-intensive, that causes the problem of determining the processes, which should be automated in order to reduce electricity costs.

In the process of electrical porcelain production, the manufacturing process is carried out in several areas:

dosing, mixing and quality control. Significantly, the quality of products depends on the mixing site. Therefore, the site of mixing of components is chosen as an object of the research. Since the purpose of any production is to obtain a product of good quality with minimal costs, the realization of this condition is possible with maximum automation of this process, that is why a system of regulation of the continuous action mixer is chosen as the subject of automation [5].

The aim of the paper is to determine the most prevalent types of mixers at Ukrainian enterprises, it is necessary to analyze the most common methods of mixing as well as to determine the types of aggregates, which are used to mix the components of the electrical porcelain.

According to its organizational and technical structure, the mixing process can be divided into periodic and continuous groups, thereafter, mixers are also divided into intermittent and continuous mixers.

While using periodical mixers, portions of the mixture components are periodically poured into the mixer, which makes it possible to set up an exact ratio, as well as to ensure stable operation with a large number of components. However, continuous mixers make their task faster due to the fact that the components are simultaneously mixed and transported to the discharge nozzle, achieving homogeneity.

The choice between continuous and periodic mixing depends on the properties of the components (par-

particle size, shape, specific gravity, humidity and other properties) [1].

The mixing process consists of the following elementary processes:

1) moving the layers of the material while increasing the inclination of its free surface to a score exceeding the angle of natural slope; with the layers of the material slipping one by one, scattering on separate particles, which penetrate the adjacent layers (convective mixing);

2) the gradual penetration of particles of various components through the newly formed boundaries of the section (diffusion mixing);

3) accumulation and agglomeration of particles of the same mass and composition in separate parts of the mixer chamber (the process of aggregation).

While mixing loose materials in a drum mixer, all of these elementary processes proceed simultaneously. However, the degree of their influence is not the same in different periods of mixing.

The entire mixing cycle can be divided into three stages (Fig. 1). At the first stage (section I), convective mixing is intensively developed. The initial heterogeneity of the substance decreases very swiftly. At this stage, the process speed is almost independent of the physical and chemical properties of the components, since the mixing proceeds at the level of the macros.

Substantive impact on the speed of the mixing process at the first stage has the trajectory of movement of the material inside the mixer.

The second stage (section II) occurs after the mixing components are generally distributed over the volume of the drum mixer. At this stage, the impact of convective and diffusion processes becomes proportional, as the process of redistribution of particles occurs at the level of individual particles (the motion of particles relative to each other).

Finally, at the third stage, when the minimum degree of heterogeneity is reached, the segregation process begins to affect (section III, curves 1 and 2). If, after partial segregation, the formed agglomerates are dispersed again, then the degree of homogeneity of the substance, estimated by the coefficient of variation, fluctuates near some score (curve 1). It is also possible (curve 2), when two opposite processes at an exact moment are balanced.

Materials and Methods. As we have mentioned, the mixing process is divided into periodic and continuous. Basing on the analysis of technological processes and equipment at the enterprises which produce electrical porcelain, we determined that the mixing process with use of a drum mixer is hold without grinding [2]. There are also installations for mixing electrical por-

celain, which are shredded during the mixing process. The working speed of the rotation provides the optimum quality of the substance and mostly depends on the physical and chemical properties [2].

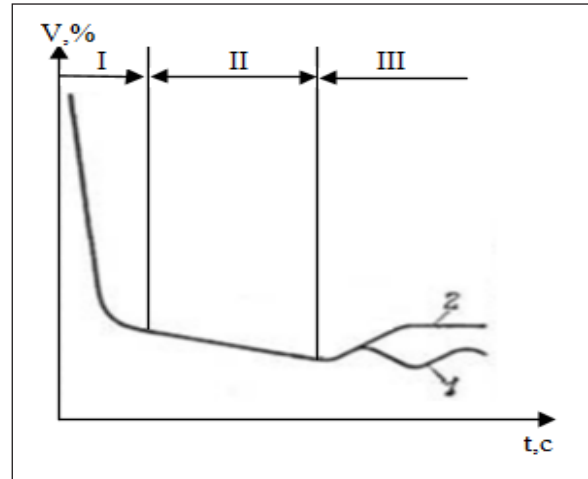


Fig. 1. The diagram of the variation coefficient change (V) for the substance obtained in the drum type mixer (t is mixing time)

The method of simultaneous mixing and grinding is considered below. Such a method can be used when the materials, which should be mixed, are close in their physical and mechanical characteristics, so that they have the same density, dimensions.

Consider the continuous process of mixing materials that we produce in a continuous drum mixer. It consists of a tubular body – 1, several bands – 2 and 4, supporting rollers 6 and 10, an electric motor – 7, a gear unit – 8, and a gear pair 9 and 3. The substance in the drum enters through the dispensing point 11, the end-product comes out from the opposite end. The substance in a mixer can be supplied continuously or dosed.

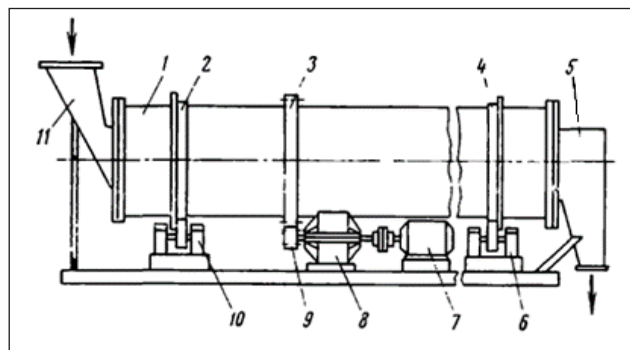


Fig. 2. Scheme of a drum mixer of continuous action

There are mixers of the following types for mixing loose materials: drum mixer with a belt stirrer, continuous operating mixer, operating mixer of periodic action, mixers with rotary blades, mixers, equipped with progressive blades.

Electrical porcelain is a multi-component substance which consists of: kaolin, clay, quartz, feldspar, gypsum, pegmatites, zircon. High requirements for electrical porcelain cause using for its production only pure and stable in the composition of ceramic raw materials [2].

As an object of automation, a drum mixer of continuous action was chosen, since the mixers of this type the most precisely mix the fractions of the same products as well as ones which differ in their sizes and gravity, hardness, fluffiness.

A mixer of the selected type meets the requirements for mixing components of electrical porcelain.

Results. Existing automation systems are operator-oriented and, as a rule, they are implemented locally, what means that the individual control of each subsystem of the process is executed. It would be optimal to manage the entire process at once.

On the basis of the analysis, we will consider the system of an electric porcelain of “Inmaks” in accordance with GOST U 51330.20–99. The mixing section control system consists of a subsystem of loading, dispensing, controlling the speed of the mixer, controlling the rotation time of the drum. The loading subsystem includes a hopper with components I ... III and capacitive level sensors for the Camlogic batches of the PFG06 series. The subsystem of dosing consists of valves for supplying components IV ... VI, dispensers D1 ... D3. And also the flowmeters C-LEVER.

The subsystem of speed control and rotation time of the drum consists of a drum mixer VII with an electric drive. Considering the site of dosing as an object of management, the main parameters that affect the quality of mixing of components is the consumption of components, the speed of the drum rotation and the time of mixing [3]. To control the filling of the drum mixer, we choose an acoustic method that has sufficient accuracy [3]. Accordingly, choose an acoustic sensor ECHO-AS-0. The block scheme of the process is shown in figure 3.

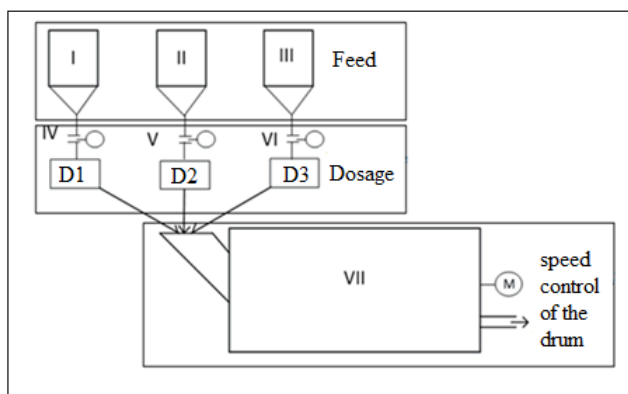


Fig. 3. The block scheme of the mixing section with subsystems

An analysis of existing control systems shows that the most common approach is to implement a mixing control system as separate local subsystems – the level of stabilization in bunkers, the subsystem of dispensing, the level of components in the mixer, and the stabilization of the number of turnovers of the drum mixer. As a rule, quality control of mixing is hold periodically by laboratory.

This approach does not provide optimal control of the entire site in the presence of perturbations that affect each subsystem, and most importantly, there may be significant deviations in the quality of mixing [4].

For this aggregate was developed a system of regulation, which makes it possible to control not only loading, but also shredding.

As the most commonly used electrical porcelain contains about 70% SiO₂, 25% Al₂O₃ and 5% other oxides, we choose these components and as the third Na₂O.

Considering a site of dosing as an object of management, the main parameters that affect the quality of mixing the components are the consumption of components, the speed of the drum, and the time of mixing. To control the filling of a drum mixer, an acoustic method with sufficient accuracy is chosen. Considering the grinding area as an object of control, the main parameters affecting the quality of grinding components are the consumption of components and the loading rate.

To assess the potential of using LQR regulators for loading and shredding in a drum mixer, a structure of a multidimensional model of the system of regulation of the level and quality of grinding in the mixer has been developed. In [5] time regulation was performed. Since not the time of material processing, but the quality of the end-product determines the result, the model is represented by three channels of regulation: the quality of mixing, the level of loading and the consumption of the materials. Each of them represents a separate sub-system of regulation for deviation. Since simultaneously managing the quality of the substance on all of three channels is quite complicated, the model proposes to implement stabilization through the channels of the level of loading in the mixer and through the dosing channel. Then the mixing quality will be determined at constant level of consumption and loading, and quality management will be performed by changing the mixing and grinding time taking into account the required dispersion composition. To implement this system, it is necessary to apply sensors at mixer output in order to determine the mixing quality and dispersion composition of the components, based on these considerations, the structure of the mixing quality management system will have the following form (Figure 4).

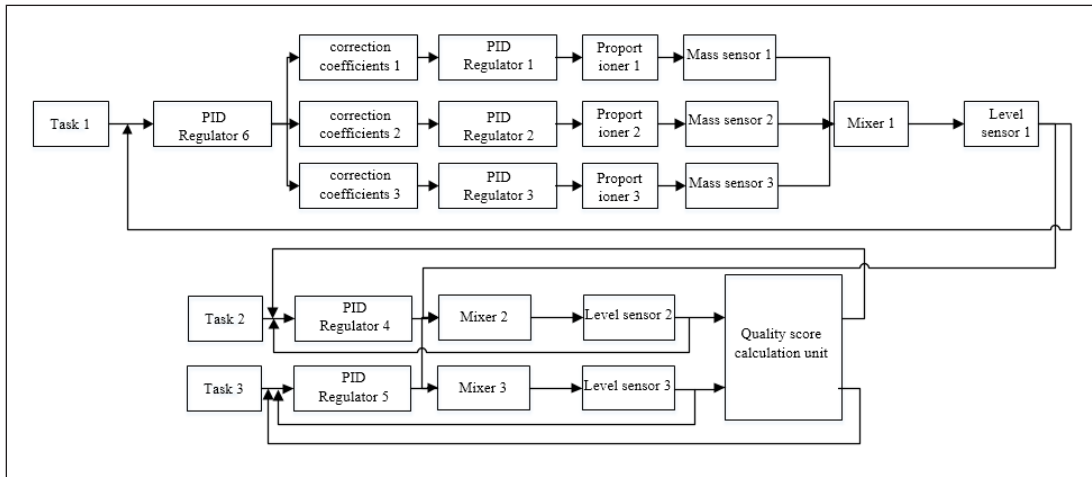


Fig. 4. The block scheme of the management system of the quality control

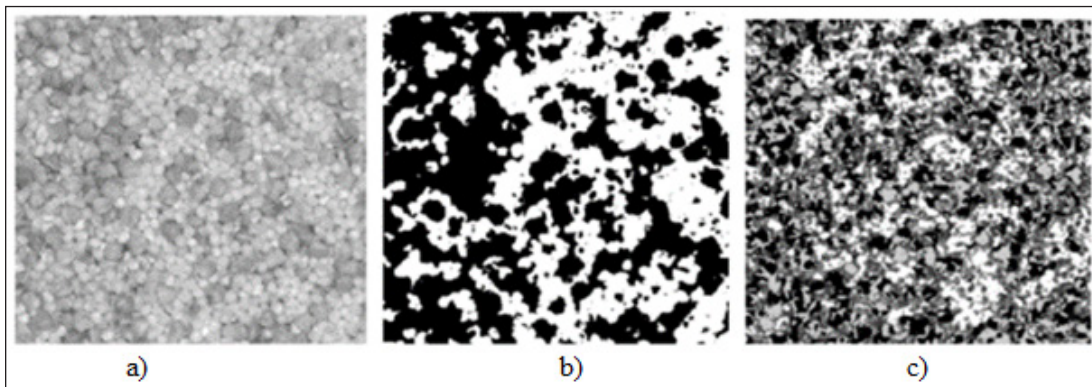


Fig. 5. An example of segmentation:
 a) the original image; b) segmentation into two clusters; c) segmentation into five clusters

As we can see, the control object is multiparameter, so it is advisable to use modern LQR regulators for its management. Therefore, it is proposed to manage the quality of mixing according to the model and the research of the control system is proposed to carry out at different levels of the forecast. The choice of the forecast level will be made basing on the information about priori data of the mixing time and the desired disperse composition.

Since there is no complete quality criteria, so it is proposed to select it considering expert assessments. Due to [5] a two-point standardized evaluation system is proposed – in the quality of mixing – 0,7; and in the dispersed composition – 0,3. Basing on the proposed block scheme of the management system of the quality control, its development in the software package MATLAB SIMULINK will be performed as a further work.

There are such methods for assessing the quality of mixing materials: weight, sowing on screens, opti-

cal, acoustic. The first and the second methods allow determining the heterogeneity of the mixture, the components of which vary either in weight or size. The third method of determining the concentrations of the main component is based on a comparative analysis of the ability of the components of the mixture to absorb, reflect and refract light. The disadvantages of these methods include their complexity and considerable time necessary to spent on quality analysis.

Recently, new ways of assessing the quality of the mixture have been proposed. Thus, [6] describes a method for determining the coefficient of heterogeneity of a substance of heavily separated bulk materials that differ in color, which includes determining the number of samples, the minimum permissible weight of the sample, sampling the mixture, finding the concentration of the main component in the sample, calculating the ratio of heterogeneity of the mixture. Finding the concentration

of a key component, the content of the sample is first distributed uniformly on a flat surface, photographed or scanned. Then they carry out computer processing of the image, representing it as an array of numbers, each element of which is expressed by a pixel, whose number corresponds to the color of the component. Then, select a range of numbers and assign all the pixels in that range to the key component and the other pixels are assigned to another range, then calculate the pixels corresponding to each component and determine the concentration of the key component, which determines the mixture heterogeneity coefficient.

$$\sum_{k=1}^K \sum_{S_{i,j} \in X_k} (S_{i,j} - \mu_k)^2 \rightarrow \min, \quad (1)$$

where K – is a number of criteria; X_k – is an array of pixels; μ_k – is centre of mass of vectors.

The main idea of this operation is that the image is segmented according to the number of clusters (Fig. 5a). If the number of clusters is equal to two, then the mask will have a black-and-white appearance after the clustering (Fig. 5b), if there are more than two clusters, then the mask will have in its composition K gradations of gray (Fig. 5c).

In the third step, the coefficient of uniformity of the mixing R for each color component is calculated using the formula:

$$R = (100\% - \sqrt{\frac{1}{m * n} * \sum_{p=1}^P (Y_p - \bar{Y}_p)}) * 100\%, \quad (2)$$

where $\frac{1}{m * n} = L$ – current range of calculation of the coefficient of uniformity for given n and m ; K – number of pixels in the L site; Y_p – is the number of pixels in the L region belonging to the n th cluster; \bar{Y}_p – is an average pixel number calculated for all ranges of L .

The proposed algorithm is implemented in the MATLAB application package using the graphical GUI interface. The resulting coefficient of uniformity confirms the visual assessment and its value is 7%. Analysis of the processing results shows that the uniformity coefficient for the first mixture is 63%, and for the second one it is 73%. Thus, the possibility of determining the coefficient of uniformity of the mixing of materials containing n components in its composition was proved theoretically and experimentally. Also, the proposed method allows to use color information, which provides a more accurate estimation of the uniformity coefficient.

Conclusions. Different wares made of electrical porcelain are needed in manufacturing as well as for providing electricity to enterprises and people. Electrical porcelain is a silicate material based on natural raw materials. Since Ukraine has substantial reserves of raw materials, the production of electrical porcelain is beneficial and in-demand. In the process of electrical porcelain production, the manufacturing process is carried out in several areas: dosing, mixing and quality control. Significantly, the quality of products depends on the mixing site. Therefore, the site of mixing of components is chosen as an object of the research. The drum mixer of continuous action was selected for the mixing process. For which a parametric scheme was developed. On the basis of the parametric scheme two models with PID, PI and regulators, and with LQR-regulator, on two channels were developed: the level in the drum – output quality, number of turnovers – output quality. To control the quality of mixing, an optical method was selected which is performed by the method of comparison of the frames received from the optical sensor. Our own criterion of the production efficiency is proposed.

References:

1. Makarov Yu.I. Apparatus for blending loose materials. M.: Mechanical Engineering, 1973. 215 p.
2. Ostapova Yu.A., Tigar A.M. Modeling of the control system for the loading level of components in a drum mixer: materials. M.: Economics and management in the conditions of the structure of the information society, 2017. 60 p.
3. Uteush E.V., Uteush Z.V. Basics of automation of grinding materials in ball mills. M.: Glavpoligafmash, 1975. 156 p.
4. Evaluation of mixing quality of bulk materials with different size of fractions: Journal / R.I. Cherkasov, K.A. Adigamov, V.V. Voronin, N.V. Gapon, R.A. Sizyakin. M.: Modern problems of science and education.
5. Patent of the Russian Federation 2371698 MPK G01N1 / 28. Method of determining the coefficient of heterogeneity of bulk materials / A.E. Lebedev, A.I. Zaitsev, A.B. Kapranova, A.A. Pavlov, A.V. Sugak. 2009.

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ СУЧАСНИХ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦІЇ НА ДІЛЯНЦІ ЗМІШУВАННЯ ПІД ЧАС ВИГОТОВЛЕННЯ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО ФАРФОРУ

У статті проведено порівняльний аналіз сучасних систем автоматизації ділянки змішування компонентів електротехнічного фарфору. Представлені можливі конструкції агрегатів та методи роботи для реалізації цього процесу. Також розглядаються методи управління, запропоновано нову структуру системи управління. Метою є дослідження сучасних методів оцінки якості змішування сипучих матеріалів у виробництві електротехнічного фарфору, а також альтернативних підходів до проектування автоматизованих систем керування процесом змішування в барабанному змішувачі.

Ключові слова: автоматична система управління, електротехнічний фарфор, критерій якості, оптичний метод, частка ключових компонентів, змішування сипучих матеріалів.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ НА УЧАСТКЕ СМЕШИВАНИЯ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ФАРФОРА

В статье проведен сравнительный анализ современных систем автоматизации участка смешивания компонентов электротехнического фарфора. Представлены возможные конструкции агрегатов и методы работы для реализации этого процесса. Также рассматриваются методы управления, предлагается новая структура системы управления. Целью является изучение современных методов оценки качества смешивания сыпучих материалов при производстве электротехнического фарфора, а также альтернативных подходов к проектированию автоматизированных систем управления процессом смешивания в барабанном смесителе.

Ключевые слова: система автоматического управления, электротехнический фарфор, критерий качества, оптический метод, доля ключевых компонентов, смешивание сыпучих материалов.

УДК 004.932

Терещенко Т.О.

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

Ямненко Ю.С.

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

Мельниченко О.Л.

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

Панченко М.В.

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

ВЕЙВЛЕТ-ПЕРЕТВОРЕННЯ ДЛЯ ФІЛЬТРАЦІЇ ЗОБРАЖЕНЬ ІЗ ВІДЕОКАМЕР СПОСТЕРЕЖЕННЯ

Проведено порівняння відомих та нового засобів фільтрації зображень із відеокамер спостереження за допомогою вейвлет-перетворень. Отримано залежності середьоквадратичної помилки фільтрації від величини порогового рівня для жорсткого і м'якого варіантів завдання порогової функції за рівня білого шуму 20% для фільтрації на базі таких вейвлетів: Хаара, дуального, дуально-комплексного та вейвлет-перетворення в орієнтованому базисі (ОБ).

Ключові слова: фільтрація зображень, вейвлет-перетворення, відеокамери спостереження.

Постановка проблеми. Останнім часом одним із важливих застосувань методів вейвлет-аналізу є фільтрація зашумлених зображень із камер відеоспостереження. Для підвищення яскравості зображення, наприклад, під час знімання вночі, зазвичай підвищують параметр чутливості ISO. Цей параметр, який використовувався ще в плівковій фотографії, визначає чутливість до світла, виражається в одиницях ISO і був перенесений у цифрову фотографію для зручності [1]. Для цифрових відеокамер і передавальних телекамер, що працюють на аналогічних матрицях, одиниці ISO не застосовуються, а світлочутливість визначається мінімальною освітленістю об'єкта знімання в люксах, що дозволяє отримувати зображення з допустимим рівнем шумів. Іноді чутливість відеокамер виражається мінімальною освітленістю за певного рівня посилення сигналу в децибелах [1].

Технічно підвищення світлочутливості здійснюється шляхом попереднього підсилення електричних сигналів світлочутливої матриці й алго-

ритмів їхнього подальшого аналогово-цифрового перетворення на колірний простір фотоапарата, в основному RGB. Тобто насправді в разі підвищення значення ISO світлочутливість фотоелементів не збільшується, а посилюється електричний струм, що в них виникає. Як наслідок, у разі підвищення світлочутливості з'являються шуми, які треба відфільтрувати, щоб отримати якісне зображення.

Крім цих завад, у зображеннях із вуличних камер відеоспостереження, зокрема, за рухом автомобілів, наявні недоліки, пов'язані з погодними умовами, забрудненням номерних знаків тощо.

Проблема, яка вирішується в цій статті, – поліпшення якості фільтрації зображень із камер відеоспостереження в умовах завад.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблемам застосування вейвлетів для фільтрації зображень присвячені роботи [2–4]. Серед наявних вейвлетів розглянемо дискретні вейвлет-перетворення (далі – ДВП) через поширення циф-

рових методів оброблення даних, а саме вейвлети Хаара, дуальний, дуально-комплексний і вейвлет в орієнтованому базисі (далі – ОБ) [6].

Двовимірне вейвлет-перетворення Хаара є результатом застосування одновимірного перетворення послідовно по рядках і колонках зображення [2].

Рис. 1 ілюструє процес обчислення двовимірного перетворення. Вихідний сигнал (зображення) представлений матрицею S.

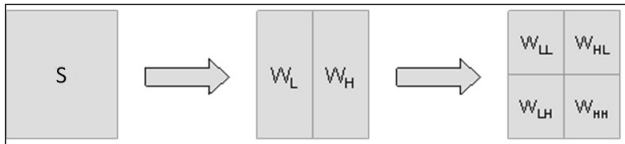


Рис. 1. Схема прямого двовимірного вейвлет-перетворення

Елементи матриць W_L та W_H обчислюються так:

$$a_{j,k} = \frac{s_{j,2k} + s_{j,2k+1}}{2}, \quad (1)$$

$$d_{j,k} = \frac{s_{j,2k} - s_{j,2k+1}}{2}, \quad (2)$$

згідно з формулами прямого одновимірного вейвлет-перетворення. До кожної колонки обох матриць W_L та W_H також застосовують крок одновимірного перетворення. У результаті, отримують чотири матриці (див. рис. 1). Матриця W_{LL} характеризує апроксимуючий складник, W_{HL} , W_{LH} , W_{HH} містять деталізуючу інформацію – вертикальну, горизонтальну і діагональну відповідно.

Зворотне перетворення або реконструкція зображення s здійснюється за формулами:

$$s'_{j,k} = a_j + d_j, \quad s'_{j,2k+1} = a_j - d_j. \quad (3)$$

Дуальне вейвлет-перетворення зображення реалізується паралельним використанням двох двовимірних дискретних вейвлет-перетворень. Потім для кожної пари субсмуг береться сума і різниця [3].

Двовимірне комплексне ДВП складається із двох паралельно застосованих дійсних ДВП, одне з яких аналогічно одновимірному випадку інтерпретується як уявна частина комплексного вейвлета, а інше – як дійсна. У дуально-комплексному вейвлет-перетворенні придушуються не самі коефіцієнти, а їх модулі [5].

Особливістю вейвлет-перетворення в орієнтованому базисі є використання трьох різних фільтрів, тому розкладання функції-оригіналу буде виконуватися за трьома видами коефіцієнтів (табл. 1).

Розрахунок являє собою ітераційну процедуру, за якої аналіз функції проводиться на різних рівнях розкладання з поступовим розширенням інтервалу розгляду від мінімального, який включає три відліки, до максимального, рівного інтервалу визначення функції [6].

Таблиця 1

ОБ вейвлет-перетворення

Пряме ОБ вейвлет-перетворення	Зворотне ОБ вейвлет-перетворення
$s_{j-1,k} = \frac{1}{\sqrt{3}} [s_{j,3k} + s_{j,3k+1} + s_{j,3k+2}];$ $d^{(1)}_{j-1,k} = \frac{1}{\sqrt{3}} [s_{j,3k} - s_{j,3k+1}];$ $d^{(2)}_{j-1,k} = \frac{1}{\sqrt{3}} [s_{j,3k} - s_{j,3k+2}].$	$s_{j,3k} = \frac{1}{\sqrt{3}} [s_{j-1,k} + d^{(1)}_{j-1,k} + d^{(2)}_{j-1,k}];$ $s_{j,3k+1} = \frac{1}{\sqrt{3}} [s_{j-1,k} - 2d^{(1)}_{j-1,k} + d^{(2)}_{j-1,k}];$ $s_{j,3k+2} = \frac{1}{\sqrt{3}} [s_{j-1,k} + d^{(1)}_{j-1,k} - 2d^{(2)}_{j-1,k}].$

Постановка завдання. Мета статті – порівняння методів фільтрації зображень на базі різних типів вейвлет-перетворень, зокрема і перетворення ОБ із різними варіантами задання порогової функції, та надання рекомендацій щодо їх використання.

Виклад основного матеріалу дослідження. Дослідимо процес фільтрації зображення за допомогою дискретних вейвлет-перетворень. Алгоритм вейвлет-оброблення зображення можна звести до побудови фільтрів вейвлетної декомпозиції та реконструкції (рис. 2).

Декомпозиція здійснюється шляхом обчислення вейвлет-коефіцієнтів за формулами прямого ДВП, наприклад, за формулами (1), (2) або табл. 1. Далі зменшуються або обнуляються значення вейвлет-коефіцієнтів невеликої амплітуди, завдяки чому відбувається шумозаглушення. Потім за новими значеннями коефіцієнтів реконструюється (синтезується) сигнал за формулою зворотного ДВП.

Зменшення значень вейвлет-коефіцієнтів здійснюється їх порівнянням із деякою пороговою

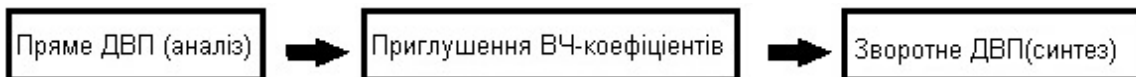


Рис. 2. Загальна схема зменшення шуму на основі вейвлет-перетворення

функцією. Розглянемо два варіанти завдання порогової функції:

1. Жорсткий:
$$v(u) = \begin{cases} u, & |u| \geq C, \\ 0, & |u| < C. \end{cases}$$

2. М'який:
$$v(u) = \begin{cases} u - C, & u \geq C, \\ u + C, & u \leq -C, \\ 0, & |u| \leq C. \end{cases}$$

Залишаються незмінними великі за модулем (найбільш значущі) вейвлет-коефіцієнти, обнуляються малі.

Порівняння методів фільтрації. Під час модулювання способів фільтрації, як-от ДВП Хаара, ОБ, дуальний та дуально-комплексний, до вихідного



Рис. 3. Зашумлене вихідне зображення

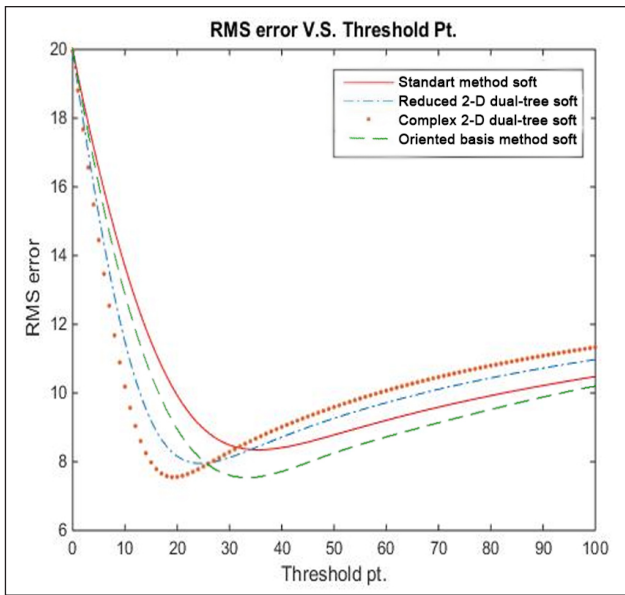


Рис. 4. Залежності середньоквадратичної помилки від рівня порога для м'якого способу задання порогової функції

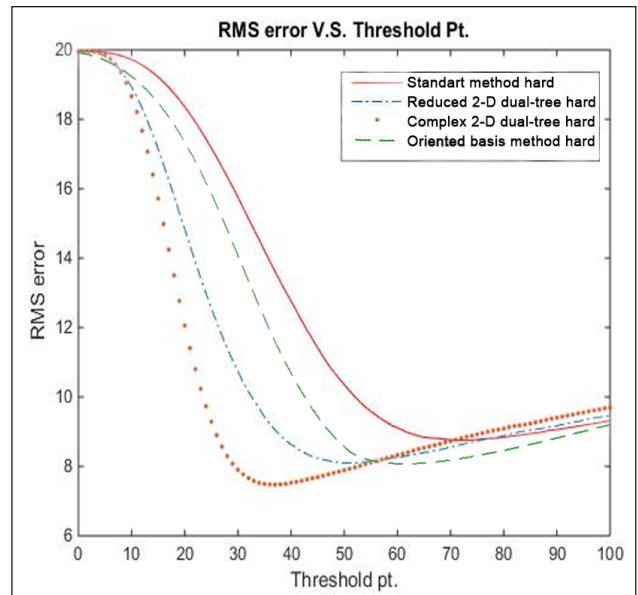


Рис. 5. Залежності середньоквадратичної помилки від рівня порога для жорсткого способу задавання порогової функції

Таблиця 2

Відфільтровані зображення

Задання порога	ДВП Хаара	ОБ	Дуальне ДВП	Дуально-комплексне ДВП
м'який				
жорсткий				

Порівняння методів фільтрації

Методи	Параметри	М'який спосіб задавання порога		Жорсткий спосіб задавання порога	
		Значення порога	RMSE, %	Значення порога	RMSE, %
ДВП Хаара		35	8	70	9
ДВП ОБ		30	7	55	8
Дуальне ДВП		25	8	50	8,5
Дуально-комплексне ДВП		20	7,5	35	7,5

зображення додаємо нормально розподілений випадковий процес (білий шум). На рис. 3 наведено вихідне зашумлене зображення. Далі проводиться фільтрація внесених завад за різних методів введення порогового рівня і варіюванні величини порога.

У табл. 2 наведено зображення, відфільтровані за допомогою різних варіантів задавання порогової функції для різних вейвлет-перетворень.

Оцінювати ефективність фільтрації будемо за значенням RMSE – середньоквадратичної помилки фільтрації:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{j=0}^M \sum_{n=0}^N [s_{j,n} - s'_{j,n}]^2}, \quad (6)$$

де $s_{j,n}$ – це початкове значення сигналу, $s'_{j,n}$ – значення реконструйованого сигналу після фільтрації.

На рис. 4. представлені результати моделювання даних методів для м'якого способу задання порогової функції.

На рис. 4 суцільною лінією позначена помилка фільтрації для вейвлет-перетворення Хаара, пунктирною – для вейвлет-перетворення в орієнтованому базисі; штрихпунктирною – для дуального вейвлет-перетворення, крапковою – для дуально-комплексного вейвлет-перетворення.

З отриманих залежностей видно, що методи дуального та дуально-комплексного вейвлет-перетворень забезпечують менше значення середньоквадратичної помилки за значень порога приблизно до 25. За більших значень порога вейвлет-перетворення в орієнтованому базисі дає кращий результат.

Отримані результати пояснюються тим, що метод дуально-комплексного вейвлет-перетворення розрізняє, на відміну від ДВП Хаара та ОБ, напрямки 45о і 135о, що сприяє більш якісному обробленню діагональних меж деталей на зображенні. Дуальне вейвлет-перетворення краще адаптується до локальних особливостей зображення. Для обох перетворень характерне більше відфільтровування корисного сигналу разом із шумом у разі збільшення значення порога. ОБ

вейвлет-перетворення має переваги за великих значень порога.

На рис. 5 представлено результати моделювання даних методів для жорсткого способу задання порогової функції. Позначення на рис. 5 такі самі, як і на рис. 4.

З рис. 5 видно, що методи дуального та дуально-комплексного вейвлет-перетворень загалом мають кращу якість фільтрації порівняно з вейвлет-перетворенням Хаара й ОБ, і лише в разі збільшення порога до 55 переваги має вейвлет-перетворення в орієнтованому базисі.

Зазначимо, що всі отримані графіки (рис. 5 і 6) починаються з однієї точки на осі середньоквадратичної помилки – це штучно створений білий шум, який забезпечує середньоквадратичну помилку 20%; далі зі збільшенням порогового рівня середньоквадратична помилка спадає до деякого мінімуму (для кожного методу він різний) – це означає, що для цього методу досягається оптимальний поріг фільтрації; потім середньоквадратична помилка знову збільшується, пояснюється це тим, що зі збільшенням порога відфільтровуються більш значущі вейвлет-коефіцієнти, які містять важливі деталі зображення.

У табл. 3 наведено мінімальне значення середньоквадратичної помилки досліджуваних методів і значення порога, за яких воно досягається для двох варіантів задавання порогової функції.

З отриманої таблиці видно, що методи вейвлет-фільтрації, які досліджувалися в даній роботі, мають майже однакове значення мінімальної середньоквадратичної помилки, але для дуального та дуально-комплексного методів вони досягаються за менших значень порога.

З отриманої таблиці видно, що методи вейвлет-фільтрації, які досліджувалися в даній роботі, мають майже однакове значення мінімальної середньоквадратичної помилки, але для дуального та дуально-комплексного методів вони досягаються за менших значень порога.

Порівняння трудомісткості методів. Найменшу кількість операцій під час обчислення вейвлет-коефіцієнтів має ОБ перетворення, що поясню-

ється наявністю $2/9 = 22\%$ нулів у матриці прямого ОБ [6]. Під час реконструкції сигналу кращі показники у ДВП Хаара. Однак загалом перетворення ОБ має невелику перевагу над перетворенням Хаара. Дуальне і дуально-комплексні ДВП найбільш трудомісткі.

Висновки. Дуальне і дуально-комплексне вейвлет-перетворення продемонстрували кращі результати фільтрації за невеликих значень порога: для м'якого способу задання порогової функції – до 25, а для жорсткого – до 55. У разі перевищення вказаних значень порогів кращий результат дає фільтрація за

допомогою вейвлет-перетворення в орієнтованому базисі. Отже, ОБ вейвлет-перетворення краще підходить для зображень із високою роздільною здатністю та високим рівнем шуму. Крім того, цей метод потребує меншого обсягу обчислень.

Методи дуального та дуально-комплексного вейвлет-перетворення ефективніші за невеликих значень порога і краще підходять для зображень із відносно низькою роздільною здатністю та низьким рівнем шуму. Однак ці методи потребують більшої кількості обчислень, ніж ОБ і вейвлет-перетворення Хаара.

Список літератури:

1. Майоров В.П., Овчинников Л.Ф., Сємин М.С. Рассуждения о телевизионных камерах. Компьютера. 1998. № 14.
2. Ясин А.С., Павлов А.Н., Павлова О.Н. Вейвлет-фильтрация зашумленных изображений. Листи в ЖТФ. 2016. 50–56 с.
3. Астафьева Н.М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения. Успехи физических наук. 1996. № 11. С. 1145–1170.
4. Воробьев В.И., Грибунин В.Г. Теория и практика вейвлет-преобразования. СПб.: ВУС, 1999. 204 с.
5. Selesnick I.W. The double-density dual-tree DWT. IEEE Trans. Signal Proces. 2004. V. 52. P. 1304. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1284828/> (дата звернення: 04.03.2018).
6. Жуйков В.Я., Терещенко Т.А., Петергеря Ю.С. Дискретные спектральные преобразования на конечных интервалах. Киев: КПИ, 2010. 244 с. ISBN 978–966–622–362–6.

ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДЛЯ ФИЛЬТРАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ВИДЕОКАМЕР НАБЛЮДЕНИЯ

Проведено сравнение известных и нового способов фильтрации изображений с видеокамер наблюдения с помощью вейвлет-преобразований. Получены зависимости среднеквадратической ошибки фильтрации от величины порогового уровня для жесткого и мягкого вариантов задания пороговой функции при уровне белого шума 20% для фильтрации на базе следующих вейвлетов: Хаара, дуального, дуально-комплексного и вейвлет-преобразования в ориентированном базисе (ОБ).

Ключевые слова: *фильтрация изображений, вейвлет-преобразования, видеокамеры наблюдения.*

WAVELET TRANSFORM FOR IMAGE FILTERING FROM SURVEILLANCE CAMERAS

Comparison of known and new method of filtering images from surveillance cameras using wavelet transforms. Dependences of the root-mean-square filter error on the threshold level for hard and soft variants of threshold function assignment with a white noise level of 20% for filtering on the basis of such wavelets are obtained: Haar, dual, dual-complex and wavelet transform at oriented basis (OB).

Key words: *image filtering, wavelet transform, surveillance cameras.*

УДК 681.51

Ткаченко В.В.

Одесский национальный политехнический университет

Беглов К.В.

Одесский национальный политехнический университет

Улицкая Е.О.

Одесский национальный политехнический университет

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ПАРОГЕНЕРАТОРЕ ПГВ-1000

Во время эксплуатации парогенераторов, работающих совместно с ядерными реакторами ВВЭР-1000 атомных электростанций, неизбежно возникает проблема растрескивания трубок и протекания воды первого контура, что обуславливает проведение планово-предупредительных ремонтов. Во время планово-предупредительных ремонтов заглушают потекшие трубки, в результате чего, с одной стороны, уменьшается площадь теплообмена, а с другой – увеличивается скорость движения теплоносителя. Поэтому актуально исследование зависимости изменения температуры теплоносителя первого контура ядерного реактора при изменении количества трубок в парогенераторе атомной электростанции. Произведена оценка влияния изменения температуры воды первого контура на мощность реактора.

Ключевые слова: парогенератор, ВВЭР-1000, температура, количество трубок, АЭС.

Постановка проблемы. Эффективное управление парогенераторами (далее – ПГ) атомных электростанций (далее – АЭС) с ВВЭР в нормальных и аварийных режимах в значительной степени обеспечивает динамическую устойчивость системы регулирования как отдельного котлоагрегата, так и всего энергоблока. Важнейшим параметром, от которого зависит выполнение этих функций, является уровень воды в ПГ, который должен поддерживаться на определенном нормированном значении. В горизонтальном ПГ обеспечивается большая площадь зеркала испарения, что облегчает сепарацию влаги из пара, естественная циркуляция рабочего тела повышает надежность установки, хотя и приводит к некоторому увеличению размеров ПГ.

Управление участком питания ПГ АЭС с ВВЭР, состоящим из четырех парогенераторов с регулирующими питательными клапанами (далее – РПК) перед каждым ПГ, в настоящее время осуществляется двумя автоматическими системами регулирования: уровня воды и производительности питательных турбонасосов (далее – ПТН). Работа этих систем взаимосвязана через объект управления, однако настраиваются они индивидуально независимо друг от друга. При глубоких внутренних и

внешних возмущениях эти системы регулирования не могут обеспечить поддержку технологических параметров в пределах нормальной эксплуатации, что приводит к разгрузке или остановке энергоблока и экономическим потерям [1].

Анализ последних исследований и публикаций. Моделирование реактора типа ВВЭР-1000 очень актуально. Много статей посвящено исследованиям моделирования поведения тела реактора при различных режимах нагрузки [2], усовершенствованию автоматизированной системы управления мощностью энергоблока АЭС для эксплуатации в маневренных режимах суточного цикла [3], моделированию энергоблока с ВВЭР-1000 как объекта управления мощностью [4], модели оценки отказа оболочки для циклической ядерной установки [5]. Однако неисследованным остается вопрос влияния изменения количества трубок теплоносителя в четырех парогенераторах реактора ВВЭР-100 на мощность энергоблока, так как во время эксплуатации изменение количества трубок невозможно.

Постановка задания. Целью статьи является разработка математического описания процесса теплопередачи энергии воды первого контура (от ядерного реактора) к теплоносителю второго

контура при изменении количества трубок в парогенераторе для исследования изменения мощности реактора ВВЭР-1000.

Изложение основного материала исследования. Водо-водяной реактор состоит из двух непересекающихся контуров. Первый контур – это и есть реактор, в котором загружено ядерное топливо. Кроме того, в этот же контур включается парогенератор и насосы, позволяющие перекачивать воду, находящуюся под давлением.

В первом контуре водо-водяного реактора вода разогревается до 320°C, жидкое состояние воды поддерживается за счет давления в 16 МПа.

Вода, нагретая за счет реакции деления ядер атомов, двигается по трубам к парогенератору. Там она превращается в пар и подогревает коллектор с водой второго контура. Благодаря такой технологии радиоактивная вода не попадает во второй контур.

Нагретая паром первого контура вода попадает в парогенератор второго контура, где ее температура равна 280°C, а давление – 6,4 МПа. В таком состоянии пар продолжает двигаться по трубам второго контура и достигает турбины, при раскручивании которой образовывается электричество [6].

Задачей данного исследования является определение зависимости температуры теплоносителя первого контура от изменения количества трубок в парогенераторе.

Количество трубок, участвующих в теплообмене, определяет площадь поверхности теплообмена, вычисляемую по формуле площади боковой поверхности цилиндра (1):

$$S = n \cdot \pi \cdot d_H \cdot h, \quad (1)$$

где h – длина одной трубки теплоносителя, (м); d_H – внешний диаметр трубки (м); n – количество трубок (шт.).

Коэффициент теплопередачи определяется по формуле (2):

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_w}{\lambda_w} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (2)$$

где α_1 – коэффициент теплоотдачи от первого теплоносителя к стенке; α_2 – коэффициент теплоотдачи от стенки ко второму теплоносителю; δ_w – толщина стенки трубки (мм); λ_w – теплопроводность материала теплообменной трубки (Вт/°C).

Зная толщину стенки трубки и теплопроводность материала, из которого она изготовлена, коэффициенты теплоотдачи можно вычислить по формулам (3):

$$\alpha_1 = \frac{Nu \cdot \lambda}{d_B} \text{ и } \alpha_2 = 0,146 \cdot p^{0,5} \cdot \Delta t^{2,33}, \quad (3)$$

где λ – теплопроводность первичного теплоносителя (Вт/°C); Nu – число Нуссельта; d_B – внутренний диаметр трубки (м); p – давление в парогенераторе (Па); Δt – разность температур (°C), которая для первого приближения задается в размере 30°C.

Для нахождения коэффициента теплоотдачи необходимо найти число Нуссельта:

$$Nu = 0,15 \cdot Re^{0,33} \cdot Pr^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_w}\right)^{0,25}, \quad (4)$$

где Pr – критерий Прандтля; Re – критерий Рейнольдса.

Также необходимо определить такие составляющие, как число Прандтля и число Рейнольдса.:

$$Pr = \frac{v \cdot c \cdot \rho}{\lambda}, \quad (5)$$

где v – коэффициент кинематической вязкости (Па·с); c – удельная теплоемкость (Дж/кг·°C); ρ – плотность жидкости (кг/м³); λ – коэффициент теплопроводности (Вт/°C);

$$Re = \frac{w \cdot d_B}{\nu}, \quad (6)$$

где w – скорость движения первичного теплоносителя (м/с).

Скорость движения первичного теплоносителя определяется по формуле (7):

$$w = \frac{4 \cdot m}{\pi \cdot d_B^2 \cdot n \cdot \rho}, \quad (7)$$

где ρ – плотность первичного теплоносителя (кг/м³); m – массовый расход греющей воды (кг/с).

Разность температур первого контура (8):

$$\Delta t_r = (t_1 - t_2) \cdot \left(1 - e^{-\frac{k \cdot S}{m \cdot c}}\right), \quad (8)$$

где t_1 – температура на входе в парогенератор (°C); t_2 – температура насыщения внутри парогенератора (°C).

Зная разность температур, определим искомую температуру:

$$t = t_1 - \Delta t_r. \quad (9)$$

Было принято допущение, что в реактор подается вода из четырех парогенераторов (рис. 1) с разным количеством трубок. С уменьшением числа задействованных в процессе теплопередачи трубок на 5, 10 и 15% от номинального количества рассчитана температура на выходе каждого из четырех парогенераторов. Результаты расчетов приведены в таблице 1 [7].

Определим среднее отклонение температуры от номинальной (280°C):

$$\Delta t_{CP} = \frac{\Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3 + \Delta t_4}{4} = 1,56 \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (10)$$

Существует такое понятие, как «температурный эффект реактивности» (далее – ТЭР) реактора – при рассматриваемой средней температуре теплоносителя в активной зоне t_r это величина

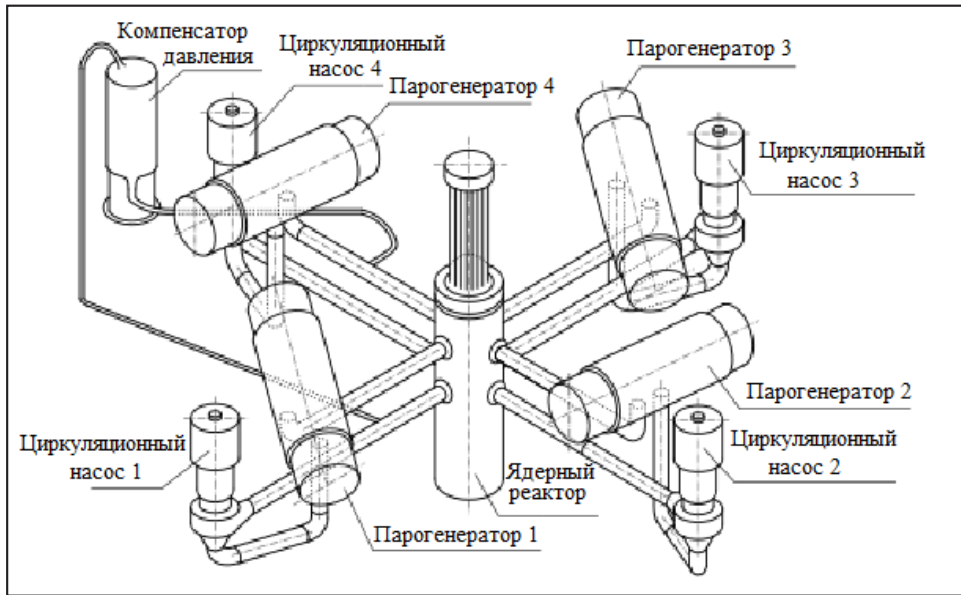


Рис. 1. Схема підключення парогенераторів к реактору

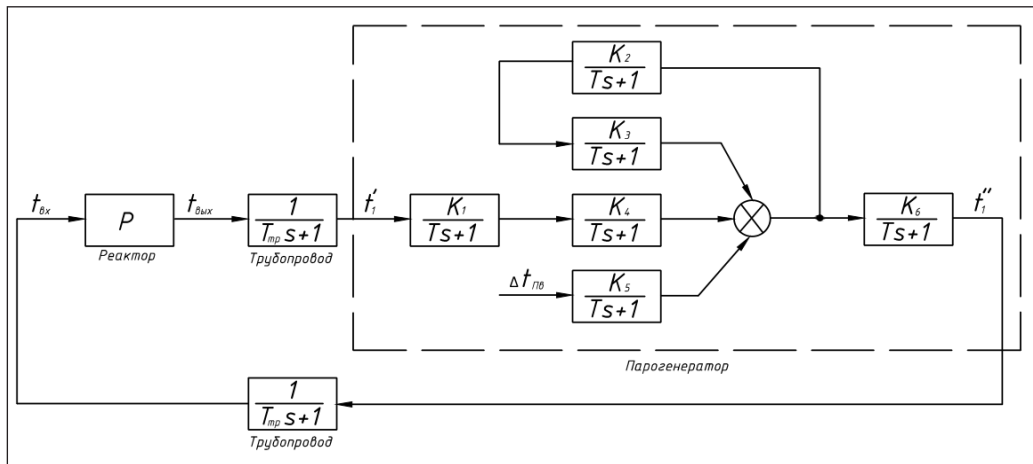


Рис. 2. Структурная схема энергоблока реактора ВВЭР-1000

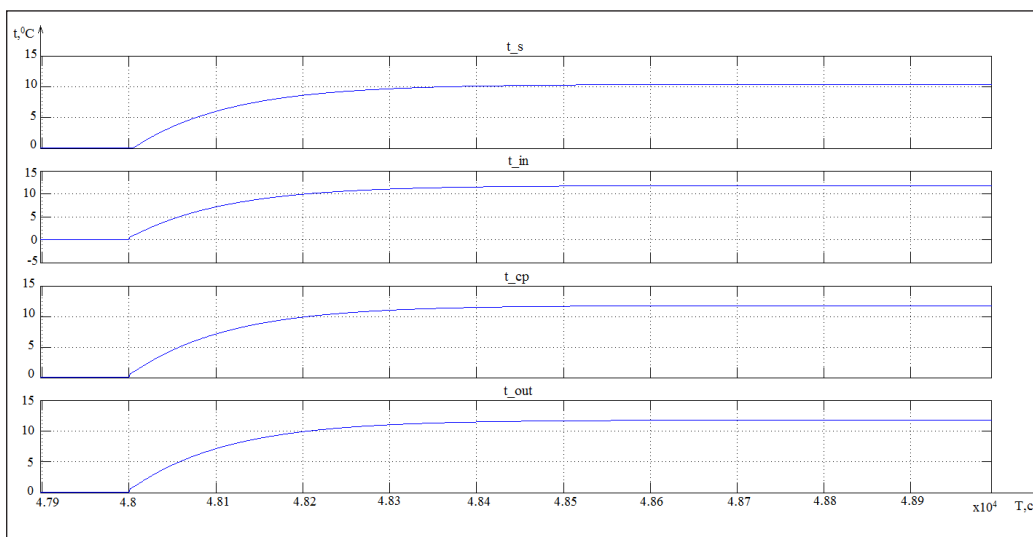


Рис. 3. Изменение температуры

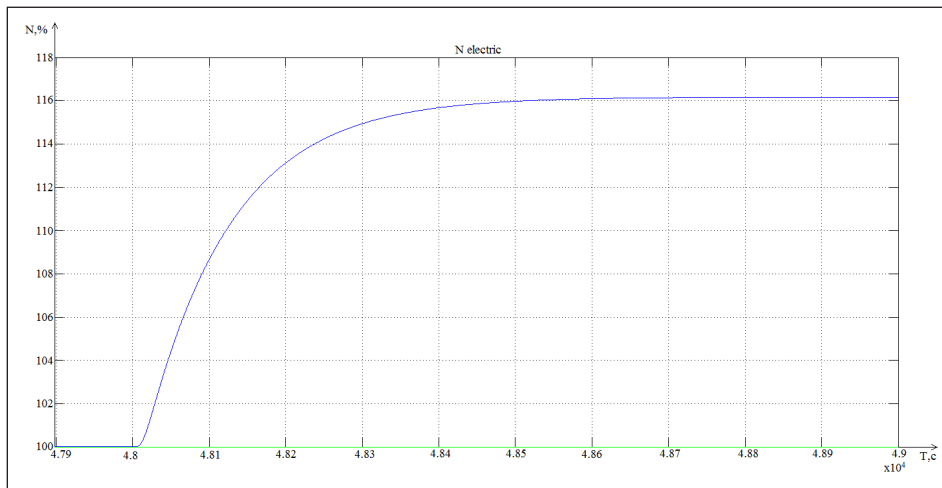


Рис. 4. Изменение мощности

изменения реактивности реактора при его разогреве от 20°C до этой температуры.

Температурный эффект реактивности в общем случае определяется по формуле:

$$\rho_i(t_T) = \int_{20}^{t_T} \alpha_i(t_T) dt_T, \quad (11)$$

где $\alpha_i(t_T)$ – температурный коэффициент реактивности (ТКР).

Таблица 1

Зависимость температуры от количества трубок

Парогенератор	Количество трубок	% соотношение	Температура, °C
1	11 000	100	280,7
2	10 450	95	281,24
3	9 900	90	281,83
4	9 350	85	282,48

В узком диапазоне изменения температур значение ТКР принимается постоянным, поэтому эффект реактивности определяют по формуле:

$$\Delta\rho_i = \alpha_i(t_T) \cdot \Delta t_T. \quad (12)$$

Однако важные с точки зрения эксплуатации температурные изменения реактивности в работающем реакторе и возникают именно при изменениях уровня мощности реактора.

Зная отклонения по температуре, смоделируем поведение реактора, используя имитационную модель энергоблока. Обобщенная структурная схема имитационной модели представлена на рисунке 2. Определим, как влияет на поведение реактора установленное отклонение температуры входного теплоносителя на 1,56°C.

Используемая математическая модель для двухконтурной ядерной энергетической установки с реакторами типа ВВЭР-1000 учитывает все сложные динамические процессы и описывается системой многих нелинейных дифференциальных уравнений [8].

В результате выполнения задачи в графической среде имитационного моделирования Simulink (Matlab) с установленной величиной возмущения температуры входного в реактор теплоносителя $\Delta t = 1,56^\circ\text{C}$ были получены кривые разгона (рис. 3 и 4), указывающие на значительное отклонение параметров рассматриваемой системы.

Изменения температур:

t_s – температура насыщения;

t_{in} – температура воды на входе в реактор;

t_{cp} – средняя температура;

t_{out} – температура на выходе из реактора.

На графиках мы видим, что при увеличении температуры воды теплоносителя на 1,56°C после парогенератора за счет обратных связей в реакторе температура теплоносителя увеличивается примерно на 12°C, а мощность энергоблока увеличивается на 16%. Выявленные отклонения технологических параметров существенно влияют на работу энергоблока.

Выводы. В результате моделирования работы энергоблока при изменённом количестве трубок в парогенераторах, а следовательно, уменьшенной суммарной поверхности теплообмена четырех парогенераторов, работающих с реактором, выяснили, что при отклонении температуры даже в 1,5°C мощность реактора увеличивается более чем на 10%.

Список літератури:

1. Демченко В. Автоматизация и моделирование технологических процессов АЭС и ТЭС. Одесса: Астропринт. 2001.
2. Сузуки М. Моделирование поведения твэла легководного реактора в различных режимах нагружения. Пер. с англ. С. Пельх. Одесса: Астропринт, 2010. 248 с.
3. Цисельська Т. Удосконалення автоматизованої системи керування потужністю енергоблока АЕС для експлуатації у маневрених режимах добового циклу: автореф. дис. ... канд. техн. Наук. Одеса: ОНПУ, 2012. 24 с.
4. Maksimov M., Beglov K., Tsiselskaya T. A model of a power unit with VVER-1000 as an object of power control. Proceedings of the Odessa polytechnic university. Odessa, 2012. Iss. 1 (38). P. 99–106.
5. Model of cladding failure estimation for a cycling nuclear unit / M. Maksimov, S. Pelykh, O. Maslov, V. Baskakov. Nuclear Engineering and Design. 2009. Vol. 239. № 12. P. 3021–3026.
6. Новости высоких технологий. URL: <https://pop-hi-tech.ru/energetika/princip-raboty-aes-atomnoj-elektrostantsii.html>.
7. Рассохин Н. Парогенераторные установки атомных электростанций. Москва: Энергоатомиздат, 1987.
8. Максимов М., Беглов К., Цисельська Т. Модель реактора ВВЕР-1000 як об'єкта управління: монографія. Сучасні технології управління. Одеса: Вид-во С.В. Купрієнко, 2012.

МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОМАСООБМІННИХ ПРОЦЕСІВ У ПАРОГЕНЕРАТОРІ ПГВ -1000

Під час експлуатації парогенераторів, що працюють спільно з ядерними реакторами ВВЕР-1000 атомних електростанцій, неминуче постає проблема розтріскування трубок і протікання води першого контуру, що зумовлює проведення планово-попереджувальних ремонтів. Під час планово-попереджувальних ремонтів заглушають трубки, що протекли, у результаті, з одного боку, зменшується площа теплообміну, а з іншого – збільшується швидкість руху теплоносія. Отже, актуальне дослідження залежності зміни температури теплоносія першого контуру ядерного реактора за зміни кількості трубок у парогенераторі атомної електростанції. Оцінено вплив зміни температури води першого контуру на потужність реактора.

Ключові слова: парогенератор, ВВЕР-1000, температура, кількість трубок, АЕС.

MODELING OF HEAT EXCHANGE PROCESSES IN THE STEAM GENERATOR SGV-1000

During the operation of steam generators working in conjunction with VVER-1000 nuclear power reactors of nuclear power plants, the problem of pipe cracking and the flow of primary circuit water inevitably arise, which causes scheduled preventive maintenance (PM). During PM, the flowing pipes are drowned, as a result of which, on the one hand, the heat exchange area decreases, and on the other hand, the velocity of the coolant increases. Thus, the problem of studying the dependence of the change in the temperature of the coolant of the primary circuit of the nuclear reactor, when the number of tubes in the steam generator of the nuclear power plant changes, becomes urgent. The effect of changing the water temperature of the primary circuit on the reactor power is estimated.

Key words: Steam Generator, VVER-1000, temperature, number of tubes, Nuclear Power Plant (NPP).

Фомін О.О.

Одеський національний політехнічний університет

МОДЕЛЬНО ОРІЄНТОВАНА ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ДІАГНОСТУВАННЯ НДС В УМОВАХ НЕПОВНОЇ АПРІОРНОЇ ІНФОРМАЦІЇ

Вирішується проблема забезпечення універсальності й підвищення надійності діагностичної процедури на основі побудови інтегральних нелінійних динамічних моделей і методів їх ідентифікації для створення ефективних інструментальних засобів інформаційної технології діагностування об'єктів різної природи.

Запропонована V-модель процедури діагностування, на основі якої побудовано модельно орієнтовану інформаційну технологію діагностування нелінійних динамічних об'єктів в умовах апріорної невизначеності.

Ключові слова: інформаційні технології, діагностика неперервних систем, діагностичні моделі, багатомірні вагові функції, ідентифікація, класифікація.

Постановка проблеми. Важливою задачею в галузі інформаційних технологій (ІТ) є цілеспрямоване управління поведінкою складних динамічних об'єктів і систем, зокрема й промислових, біологічних і господарських. Зростання складності сучасних об'єктів діагностування (далі – ОД), збільшення джерел інформації, експлуатація в широкому діапазоні зовнішніх умов зумовлює підвищені вимоги до точності й надійності рішень з управління та діагностування в умовах істотної неповноти й апріорної невизначеності інформації. Це призводить до проблеми розроблення нових ефективних методів математичного забезпечення систем отримання й оброблення діагностичної інформації (далі – ДІ), які б дозволили забезпечити необхідні вимоги до точності й надійності рішень з управління й автоматизувати процес діагностування ОД. При цьому надійність автоматизованих систем діагностування (далі – АСД) визначається властивостями об'єкта зберігати в часі в установлених межах значення всіх параметрів, що характеризують здатність виконувати необхідні функції.

Значне зростання продуктивності обчислень і зниження вартості сучасних багатоядерних процесорів дозволяє істотно підвищити ефективність АСД і розширити галузі застосування ІТ-контролю й діагностики, однак на практиці це не відбувається. Використання наявних АСД обмежується їхньою недостатньою надійністю й універсальністю, що зумовлено дією комплексу

протиріч: з одного боку, схожістю розв'язуваних задач в АСД різного прикладного застосування, а з іншого – відсутністю застосування універсальних інформаційних моделей як первинного джерела даних для побудови діагностичних просторів вторинних ознак; великою кількістю теоретичних напрацювань і ІТ в галузі оброблення ДІ, відсутністю методологічних основ побудови АСД в умовах неповної апріорної інформації, що не дозволяє проводити їх цілеспрямований синтез і порівняльну оцінку отриманих варіантів; зростаючими потребами в розширенні сфери практичних застосувань АСД й обмеженими можливостями традиційних підходів до створення АСД за універсальністю та надійністю.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Нині існує добре розвинута теоретична база побудови систем технічної діагностики [1]. Запропоновано багато методів побудови АСД, що інтегрують у собі отримання первинного опису ОД (ідентифікацію ОД) [2; 3], побудову діагностичних просторів (редукцію діагностичних моделей) [4–7] і побудову визначальних правил оптимальної класифікації (машинне навчання) [8; 9]. Але й досі немає ефективної технології побудови систем технічної діагностики неперервних динамічних ОД, яка б надійно вирішувала задачі діагностування в умовах апріорної невизначеності.

Зазначені вище проблеми визначають актуальність роботи, зумовлюють необхідність розроблення методологічних принципів побудови

АСД в умовах неповної апріорної інформації й створення ефективної ІТ вирішення задач непрямого контролю й діагностики в автоматизованих системах управління якістю ОД різної фізичної природи.

Постановка проблеми. Важливою задачею в галузі інформаційних технологій (ІТ) є цілеспрямоване управління поведінкою складних динамічних об'єктів і систем, зокрема й промислових, біологічних і господарських. Зростання складності сучасних об'єктів діагностування (далі – ОД), збільшення джерел інформації, експлуатація в широкому діапазоні зовнішніх умов зумовлює підвищені вимоги до точності й надійності рішень з управління та діагностування в умовах істотної неповноти й апріорної невизначеності інформації. Це призводить до проблеми розроблення нових ефективних методів математичного забезпечення систем отримання й оброблення діагностичної інформації (далі – ДІ), які б дозволили забезпечити необхідні вимоги до точності й надійності рішень з управління й автоматизувати процес діагностування ОД. При цьому надійність автоматизованих систем діагностування (далі – АСД) визначається властивостями об'єкта зберігати в часі в установлених межах значення всіх параметрів, що характеризують здатність виконувати необхідні функції.

Значне зростання продуктивності обчислень і зниження вартості сучасних багатоядерних процесорів дозволяє істотно підвищити ефективність АСД і розширити галузі застосування ІТ-контролю й діагностики, однак на практиці це не відбувається. Використання наявних АСД обмежується їхньою недостатньою надійністю й універсальністю, що зумовлено дією комплексу протиріч: з одного боку, схожістю розв'язуваних задач в АСД різного прикладного застосування, а з іншого – відсутністю застосування універсальних інформаційних моделей як первинного джерела даних для побудови діагностичних просторів вторинних ознак; великою кількістю теоретичних напрацювань і ІТ в галузі оброблення ДІ, відсутністю методологічних основ побудови АСД в умовах неповної апріорної інформації, що не дозволяє проводити їх цілеспрямований синтез і порівняльну оцінку отриманих варіантів; зростаючими потребами в розширенні сфери практичних застосувань АСД й обмеженими можливостями традиційних підходів до створення АСД за універсальністю та надійністю.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Нині існує добре розвинута теоретична база побу-

дови систем технічної діагностики [1]. Запропоновано багато методів побудови АСД, що інтегрують у собі отримання первинного опису ОД (ідентифікацію ОД) [2; 3], побудову діагностичних просторів (редукцію діагностичних моделей) [4–7] і побудову визначальних правил оптимальної класифікації (машинне навчання) [8; 9]. Але й досі немає ефективної технології побудови систем технічної діагностики неперервних динамічних ОД, яка б надійно вирішувала задачі діагностування в умовах апріорної невизначеності.

Зазначені вище проблеми визначають актуальність роботи, зумовлюють необхідність розроблення методологічних принципів побудови АСД в умовах неповної апріорної інформації й створення ефективної ІТ вирішення задач непрямого контролю й діагностики в автоматизованих системах управління якістю ОД різної фізичної природи.

Постановка завдання. Метою роботи є вирішення проблеми забезпечення універсальності й підвищення надійності діагностичної процедури на основі побудови інтегральних нелінійних динамічних моделей і методів їх ідентифікації для створення ефективних інструментальних засобів інформаційної технології діагностування об'єктів різної природи в умовах неповної апріорної інформації.

Під ефективністю інструментальних засобів треба розуміти підвищення точності рішень та скорочення часу на їх пошук.

Виклад основного матеріалу дослідження. У результаті аналізу й класифікації методів діагностування встановлено, що наразі в технічній діагностиці розвивається напрям, заснований на відновленні моделі ОД (модельна діагностика). При цьому зазвичай передбачається, що несправності змінюють тільки параметри моделі об'єкта, які під час діагностування оцінюються методами параметричної ідентифікації. Однак часто дефекти призводять до зміни не тільки параметрів моделі об'єкта, але й її структури, що зумовлює застосування методів непараметричної ідентифікації для побудови математичної моделі ОД на основі даних експерименту «вхід – вихід» [10].

За результатами проведеного аналізу визначено, що відомі моделі діагностування недостатньо мірою враховують основні особливості ОД (нелінійні та динамічні характеристики), тому не можуть забезпечити універсальність діагностичної процедури. Так, наявні методи модельної діагностики, засновані на використанні динамічних характеристик, обмежуються тільки лінійними моделями, а методики, засновані на обліку

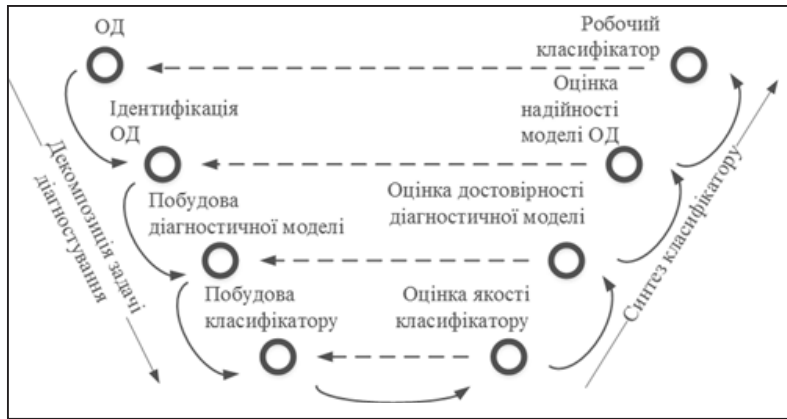


Рис. 1. V-модель процедури діагностування

ефектів нелінійності, використовують інформацію тільки про властивості статичних характеристик. Реальні об'єкти, як правило, одночасно володіють і нелінійними, і динамічними властивостями. Тому як опис ОД невідомої структури доцільно використовувати нелінійні непараметричні динамічні моделі.

Зроблено висновок, що для вирішення проблеми забезпечення універсальності діагностичної процедури й підвищення надійності діагностування неперервних нелінійних динамічних об'єктів різної природи доцільно використовувати непараметричні інтегральні моделі на основі степеневих рядів Вольтерра, які описують нелінійні та динамічні властивості ОД у вигляді послідовності інваріантних до виду вхідного сигналу БВФ.

Однак наявні прикладні алгоритми діагностування НДС на основі модельної діагностики все ще не використовують повною мірою можливості математичного апарату. Це зумовлено низкою причин, найбільш важливими з яких є суттєвий вплив похибок вимірювань і неповна апріорна визначеність ОД, що обмежує застосування алгоритмів у реальних умовах; відсутність універсальної методології вирішення задач діагностики складних неперервних систем різної фізичної природи, недостатня розвиненість програмно-алгоритмічного забезпечення задач ідентифікації та діагностики НДС.

Під час побудови діагностичної моделі виділяють три рівні опису ОД.

Вихідний рівень, на якому функції $w_k(\tau_1, \dots, \tau_k)$, одержувані в результаті ідентифікації ОД, розглядаються як єдине ціле.

Рівень вихідних ознак, на якому функція $w_k(\tau_1, \dots, \tau_k)$ представлена вектором $x_k = (x_{1k}, \dots, x_{nk})'$. Інформативні ознаки можуть бути отримані за

допомогою попереднього перетворення $T_j: C[a, b] \rightarrow R^n$, ($j=1, \dots, n$): $x_{jk} = T_j(w_k(\tau_1, \dots, \tau_k))$; де $C[a, b]$ – простір дійсних безперервних функцій, заданих на відрізку $[a, b]$; a, b – деякі дійсні числа. У якості оператора T_j можуть застосовуватися ортогональні розкладання й інтегральні перетворення БВФ у вектори коефіцієнтів базисних функцій. У найпростішому випадку оператор T_j є оператором дискретизації $x_{jk} = w_k(t_j, \dots, t_j)$, $t_j = j\Delta t$, де Δt – крок дискретизації. Аналогічно формується вектор ознак на основі частотних характеристик: багатовимірної амплітудно-частотної $A_k(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_k)$ і фазочастотної $\phi_k(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_k): x_{2j-1} = A_k(\omega_j, \dots, \omega_j)$, $x_{2j} = \phi_k(\omega_j, \dots, \omega_j)$, $\omega_j = j\Delta\omega$, $j = 1, 2, \dots, n$.

Рівень стиснення ознак полягає в знаходженні оптимального в деякому сенсі перетворення A вихідного простору векторів вимірювань X розмірністю n у просторі зображень меншої розмірності Y (розмірністю $m < n$). У цьому разі нові ознаки виявляються відірваними від конкретного фізичного змісту й мають тільки абстрактне інформаційне значення.

Застосування методу модельної діагностики, що розглядається, пов'язане з вирішенням завдання параметризації БВФ на рівні вихідних ознак і рівні стиснення ознак.

Застосування методу модельної діагностики, що розглядається, пов'язане з вирішенням завдання параметризації БВФ на рівні вихідних ознак і рівні стиснення ознак.

Оцінка інформативності інтегральних динамічних моделей, отриманих на основі БВФ, визначається на основі критерію максимальної ймовірності правильного розпізнавання (далі – ППР) P_{max} , що реалізується побудованою системою розпізнавання на підмножині X' із заданої множини ознак X ($X' \subset X$) в обраній системі ознак:

$$P = \sum_{i=1}^m l_i \cdot \left(\sum_{i=1}^m L_i \right)^{-1}, \quad (1)$$

де l_i – кількість правильно класифікованих елементів i класу в екзаменаційній вибірці; L_i – кількість елементів i класу в екзаменаційній вибірці; m – кількість класів.

Класифікатор будується з використанням правил прийняття рішень на основі дискримінантних функцій, побудованих статистичними методами або на основі нейронних мереж (далі – НМ) у ході процесу навчання.

ROC-аналіз класифікаторів. Класифікатори, побудовані в різних системах ознак, додатково досліджуються за допомогою ROC-аналізу.

ROC-крива демонструє залежність числа правильно класифікованих справжніх позитивних

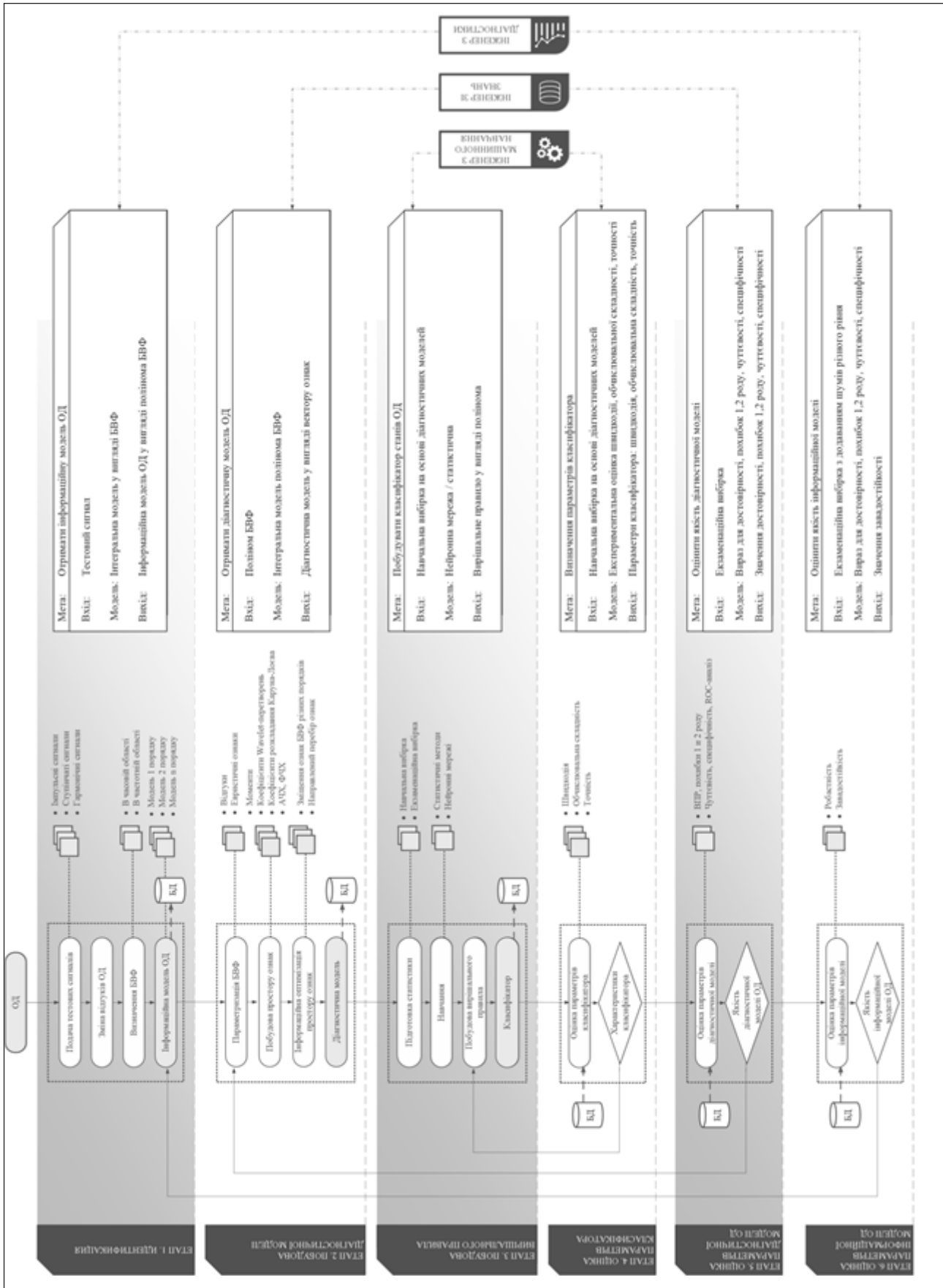


Рис. 2. Алгоритм модельно орієнтованої інформаційної технології модельної діагностики

результатів (TP) із числа неправильно класифікованих помилкових негативних результатів (FN). Таким чином, ROC-крива демонструє компроміс між чутливістю S_e і специфічністю S_p .

Чутливість і специфічність визначаються за допомогою таких формул:

$$S_e = \frac{TP}{TP + FN} \cdot 100\%, \quad (2)$$

$$S_p = \frac{TN}{TP + FN} \cdot 100\%, \quad (3)$$

де TP – кількість справжніх позитивних результатів, TN – кількість справжніх негативних результатів, FN – кількість помилкових негативних результатів, TN – кількість дійсних негативних наслідків, FP – кількість помилкових спрацьовувань.

Із метою побудови універсальної процедури діагностування складних ОД різної фізичної природи визначені ключові етапи перетворення діагностичної інформації (побудови класифікатора) та етапи верифікації отриманих моделей на кож-

ному рівні. Запропонована V-модель процедури діагностування (рис. 1), на основі якої побудовано модельно орієнтовану інформаційну технологію діагностування нелінійних динамічних ОД в умовах апіорної невизначеності (рис. 2).

Висновки. У роботі здійснено спробу подальшого розвитку теорії діагностування складних об'єктів контролю типу «чорний ящик» шляхом розроблення V-моделі процедури діагностування, що дозволяє зробити процес діагностування придатним для використання в умовах апіорної невизначеності.

Запропонована модельно орієнтована інформаційна технологія модельної діагностики неперервних динамічних об'єктів вирішує актуальну науково-технічну проблему забезпечення універсальності й підвищення надійності діагностики під час створення новітніх автоматизованих систем діагностування об'єктів різної природи в умовах неповної апіорної інформації.

Список літератури:

1. Korbicz J. & Koscielny J., (eds). Modeling, Diagnostics and Process Control: Implementation in the DiaSter System. Springer: Berlin, 2010.
2. Mmgalski M., Korbicz J. Robust fault diagnosis via parameter identification of dynamical systems. European Control Conference, ECC 2009. 2014.
3. Simani S., Fantuzzi C., Dynamic system identification and model-based fault diagnosis of an industrial gas turbine prototype. Mechatronics. Volume 16. Issue 6, July 2006. P. 341–363.
4. Pazera M., Korbicz, J. A process fault estimation strategy for non-linear dynamic systems. Journal of Physics: Conf. Series 783. 2017.
5. Tang H., Liao Y., Cao J., Xie H. Fault Diagnosis Approach Based on Volterra Models. Mechanical Systems and Signal Processing. 2010. Vol. 24. Pp. 1099–1113.
6. Fomin A., Pavlenko V. Construction of diagnostic features space using Volterra kernels moments. Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR). 2015 20th International Conference: 24–27 Aug. 2015 Miedzyzdroje, Poland. Pp. 1022–1027.
7. Chen W., Khan A., Abid M., Ding S. Integrated design of observer based fault detection for a class of uncertain nonlinear systems. International Journal of Applied Mathematics and Computer Science. 2011. 21(3). Pp. 423–430.
8. Pavlenko V., Fomin O., Ilyin V. Technology for Data Acquisition in Diagnosis Processes By Means of the Identification Using Models Volterra. Proc. of the 5th IEEE Int. Workshop on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS'2009), Rende (Cosenza), Italy, 2009. Pp. 327–332.
9. Hao Tang, Liao Y., Cao J., Hang Xie. Fault diagnosis approach based on Volterra models. Mechanical Systems and Signal Processing. May 2010. Volume 24. Issue 4. Pp. 1099–1113.
10. Фомін О. Метод побудови простору діагностичних ознак на основі інтегральних динамічних моделей. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. Т. 29 (68) № 1 2018, Ч. 2. С. 43–47.

МОДЕЛЬНО ОРИЕНТИРОВАННАЯ ИНФОРМАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ НДС В УСЛОВИЯХ НЕПОЛНОЙ АПРИОРНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Решается проблема обеспечения универсальности и повышения надежности диагностической процедуры на основе построения интегральных нелинейных динамических моделей и методов их идентификации для создания эффективных инструментальных средств информационной технологии диагностирования объектов различной природы.

Предложена V-модель процедуры диагностики, на основе которой построена модельно ориентированная информационная технология диагностирования нелинейных динамических объектов в условиях априорной неопределенности.

Ключевые слова: информационные технологии, диагностика непрерывных систем, диагностические модели, многомерные весовые функции, идентификация, классификация.

**MODEL ORIENTED INFORMATION TECHNOLOGY OF DIAGNOSTICATION
OF VAT IN THE CONDITIONS OF APRILINE INFORMATION INFRASTRUCTURE**

The problem of ensuring universality and increasing the reliability of the diagnostic procedure is based on the construction of integral nonlinear dynamic models and their identification methods for creating effective instrumental means of information technology for the diagnosis of objects of various natures.

The V-model of the diagnostic procedure is proposed, on the basis of which a model oriented information technology for diagnosing nonlinear dynamic objects in a priori uncertainty conditions is constructed.

Key words: *information technologies, diagnostics of continuous systems, diagnostic models, multidimensional weight functions, identification, classification.*

УДК 681.51

Чернов М.Ю.

Одесский национальный политехнический университет

Харабет А.Н.

Одесский национальный политехнический университет

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПРОЦЕССА УПРАВЛЕНИЯ УДАЛЕНИЕМ КИСЛОРОДА В ДЕАЭРАТОРЕ АТОМНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

В статье рассмотрена возможность модернизации процесса удаления кислорода в деаэраторе за счет замены одноконтурной АСР каскадной. Синтезирована и исследована математическая модель системы автоматического регулирования удаления кислорода с применением кислородомера.

Ключевые слова: деаэрирование питательной воды, деаэратор, кислородомер, система автоматического регулирования, каскадная АСР.

Постановка проблемы. В данный момент автоматическое регулирование деаэратора осуществляется за счет управления расходом греющего пара, подаваемого в деаэрационную колонну. Управление уровнем деаэрированного конденсата, поступающего в бак-аккумулятор, осуществляется добавкой химически очищенной воды. Деаэрация воды в устройстве происходит в соответствии с законом Генри, т. е. количество растворенного газа в воде пропорционально давлению этого газа над жидкостью.

Однако в реальных условиях не всегда получается добиться требуемого качества деаэрации воды, и количество газа в конденсате, идущем после устройства, значительно больше требуемых значений. Это приводит к увеличению коррозии внутри компонентов греющего устройства, к уменьшению срока работы оборудования, а также к большим затратам на замену вышедших из строя компонентов.

Анализ последних исследований и публикаций. В многочисленных теоретических работах контролю над количеством газа после устройства не уделяется достаточного внимания, поскольку в деаэраторе используется закон Генри, а именно:

$$G_r = k_r \times P_r, \quad (1)$$

где G_r – количество растворенного в воде газа;
 k_r – коэффициент абсорбции газа жидкостью или коэффициент растворимости газа, зависящий от температуры;

P_r – парциальное давление газа над жидкостью.

Поскольку наиболее вредным является присутствие кислорода в компонентах греющего устройства, контроль его количества в воде наиболее важен. Растворимость кислорода в пресной воде при 0,1 МПа в зависимости от температуры представлена на рис. 1.

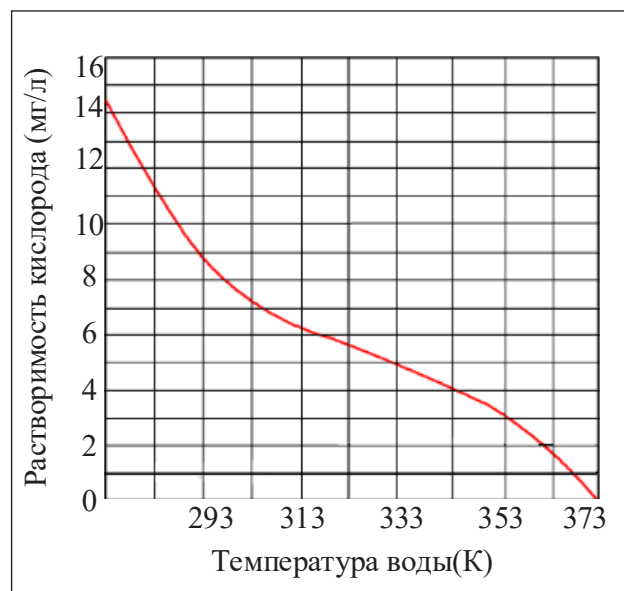


Рис. 1. График растворимости кислорода в пресной воде при 0,1 МПа в зависимости от температуры

Постановка задания. Цель статьи – проверить, эффективно ли вместо одноконтурной системы регулирования давления пара в деаэра-

ціонной колонне применять каскадную систему с включением автоматического газоанализатора.

Изложение основного материала исследования. В работе рассматривается усовершенствование автоматической системы регулирования

давления в деаэраторе (рис. 2) путем замены одноконтурной системы каскадной (рис. 3).

Структурная схема автоматической системы регулирования давления в деаэраторе показана на рис. 4.

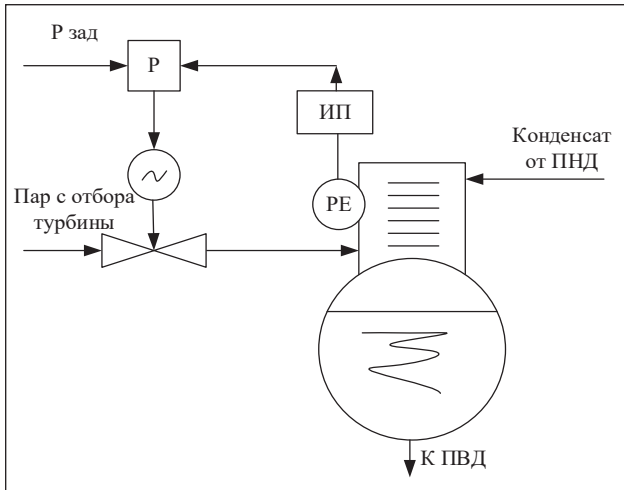


Рис. 2. Традиционная структура АСР давления в деаэраторе

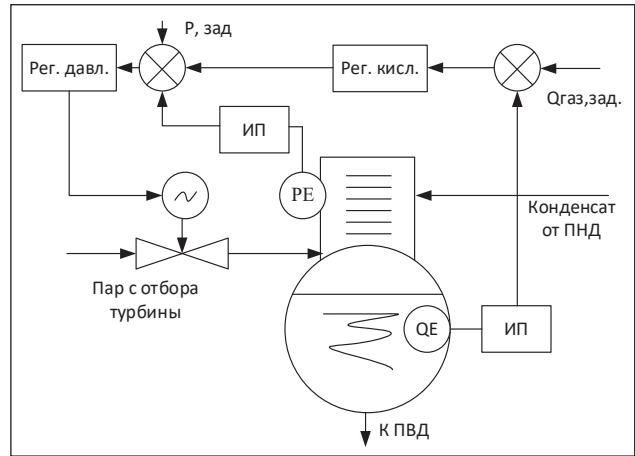


Рис. 3. Предлагаемая структура АСР удаления кислорода в деаэраторе с применением кислородомера

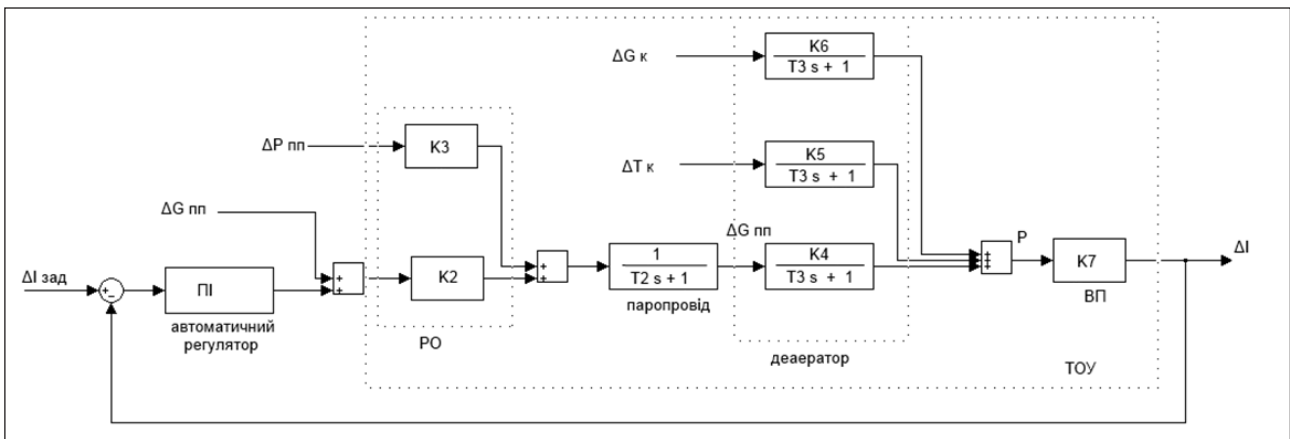


Рис. 4. Структурная схема АСР давления в деаэраторе

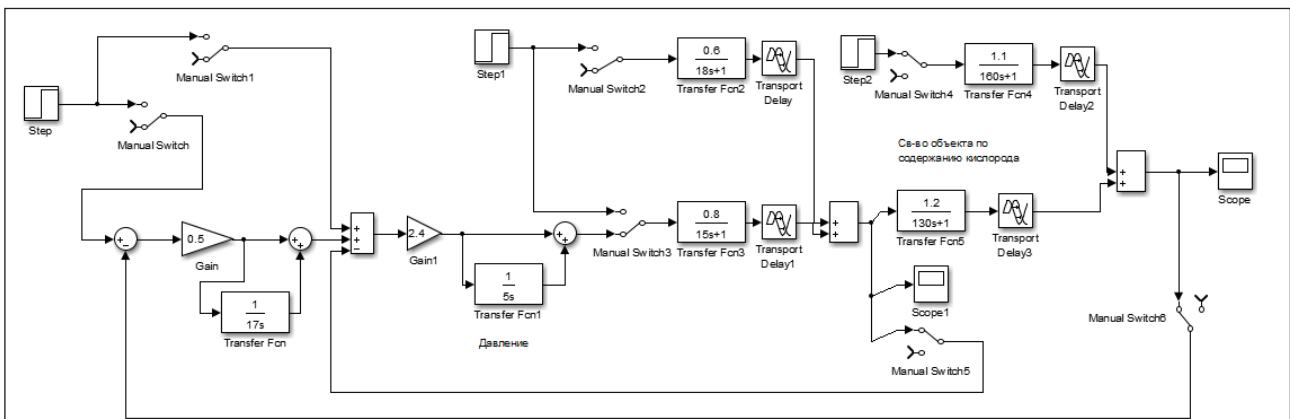


Рис. 5. Схема электронной модели автоматической системы регулирования удаления кислорода в деаэраторе

Схема электронной модели автоматической системы регулирования удаления кислорода в деаэраторе показана на рис. 5.

Следующим этапом будет нахождение настроек регулятора по каналу свойства объекта по содержанию кислорода [3, с. 103].

Аппроксимировав кривую разгона по каналам «содержание кислорода – возмущение по давлению пара» и «давление в деаэраторе – расход пара» по методу Л.Й. Кона, получаем оптимальные настройки регуляторов [3]. Переходные процессы показаны на рисунках 8, 9.

На рис. 8 определены следующие характерные показатели качества регулирования [3, с. 103], среди которых такие:

- $\Delta x(m_1) = 0.3$ – первый максимум отклонения управляемой переменной;
- $\Delta x(m_3) = 0.04$ – третий максимум отклонения управляемой переменной;
- $t_p = 1040$ с – время регулирования;
- $\Delta x_{ост} = 0$ – остаточная статическая погрешность регулирования.

Кроме этих показателей, существуют также показатели, требующие вычисления, например, показатель затухания колебаний.

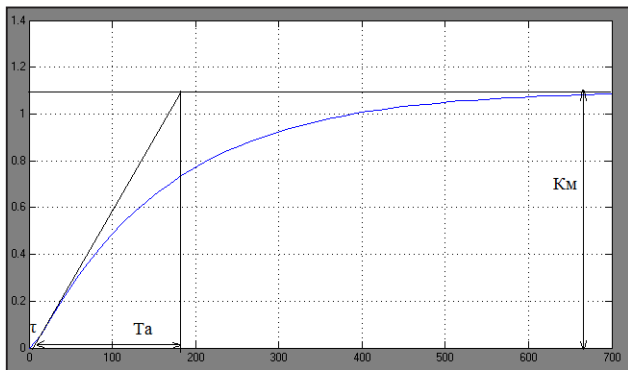


Рис. 6. Кривая разгона по каналу «содержание кислорода – возмущение по давлению пара»

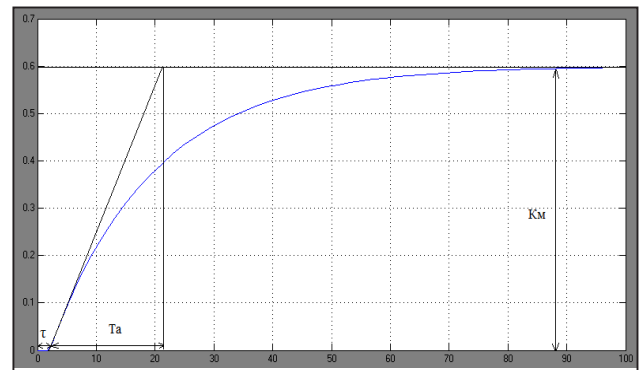


Рис. 7. Кривая разгона по каналу «давление в деаэраторе – расход пара»

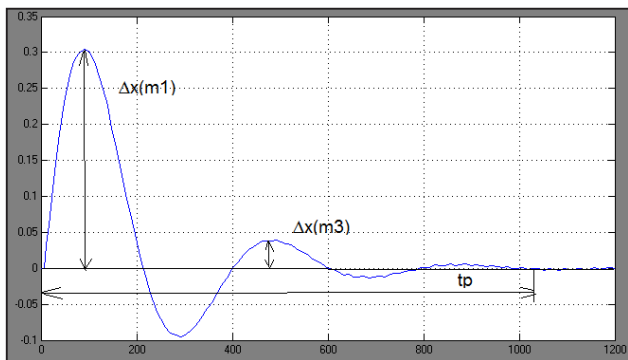


Рис. 8. Переходный процесс по каналу «содержание кислорода – возмущение по давлению пара»

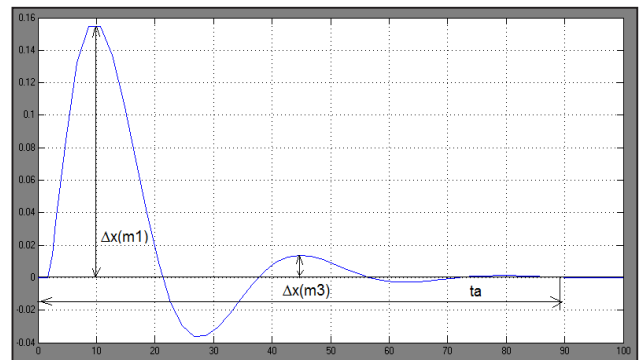


Рис. 9. Переходный процесс по каналу «давление в деаэраторе – расход пара».

$$\Psi = (\Delta x m_1 - \Delta x m_3) / \Delta x m_1, \quad (2)$$

$$\Psi = (0.3 - 0.04) / 0.3 = 0.87$$

На рис. 9 определены следующие характерные показатели качества регулирования [3, с. 103], среди которых:

- $\Delta x(m_1) = 0.158$;
- $\Delta x(m_3) = 0.015$;
- $t_p = 89$ с;
- $\Delta x_{ост} = 0$;
- $\Psi = 0.9$.

Анализируя полученные на модели переходные процессы регулирования, можем заключить следующее. Одноконтурная система регулирования обеспечивает следующие показатели качества:

- $\Delta x m_1 = 0,08$;
- $\Delta x m_3 = 0,008$;
- $t_p = 150$ с;
- $\Delta x_{ост} = 0$;
- $\Psi = 0.9$.

После сравнения показателей качества регулирования видим, что традиционная структура автоматической системы регулирования давления в деаэраторе обеспечивает наименьшее время

регулювання, однак проявляється більший перший максимум відхилення управляємої перемінної. Традиційна схема також не завжди забезпечує вимогу якості видалення газів в теплоносії. Разом з тим запропонована схема автоматичної системи регулювання видалення кисню в деаераторі достатньо ефективно контролює кількість газу, розчиненого в теплоносії.

Висновки. В роботі розглянуто покращену схему автоматичної системи регулювання

видалення кисню в деаераторі з використанням кислородоміра, при якій існує можливість отримання значущої економії за рахунок збільшення терміну роботи елементів нагрівача. Для об'єкта управління синтезована система співвідношень «тиск – кисень» в середовищі Simulink пакету MATLAB. Ця система може бути налаштована традиційними методами. Отримані параметри налаштування можуть бути перекладені в відповідні параметри для цифрових контролерів.

Список литературы:

1. Деаэрационная установка: учебное пособие. ОП «Запорожской АЭС», 2005. 383 с.
2. Бундюк А.М. Методические указания к лабораторным работам по дисциплине «Компьютерные системы анализа эффективности в энергетике». Одесса, 2005. 174 с.
3. Харабет В.М. Изучение классической теории автоматического управления с помощью современного персонального компьютера: учеб. пособие. О., Бахва, 2014. 188 с.
4. Демченко В.А. Автоматизация и моделирование технологических процессов АЭС и ТЭС. Одесса, 2001. 308 с.

ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ПРОЦЕСУ УПРАВЛІННЯ ВИДАЛЕННЯМ КИСНЮ В ДЕАЕРАТОРІ АТОМНОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СТАНЦІЇ

У статті розглянуто можливість модернізації процесу видалення кисню в деаераторі за рахунок заміни одноконтурної АСР каскадною. Синтезована й досліджена математична модель системи автоматичного регулювання видалення кисню із застосуванням киснеміра.

Ключові слова: деаерування живильної води, деаератор, киснеміри, система автоматичного регулювання, каскадна АСР.

STUDY OF THE DYNAMICS OF THE CONTROL PROCESS OF REMOVAL OF OXYGEN IN THE DEAERATOR NUCLEAR POWER STATION

The possibility of modernization of the process of oxygen removal in the deaerator, due to the replacement of single-loop ACS cascade is considered in the article. A mathematical model of the system for automatic control of oxygen removal using an oxygen meter was synthesized and studied.

Key words: deaeration of nutrient water, deaerator, oxygen meter, automatic control system, cascade ACS.

УДК 629.735

Шмельов Ю.М.

Кременчуцький льотний коледж
Національного авіаційного університету

Владов С.І.

Кременчуцький льотний коледж
Національного авіаційного університету

Хебда А.С.

Кременчуцький льотний коледж
Національного авіаційного університету

Котляров К.Г.

Кременчуцький льотний коледж
Національного авіаційного університету

ЗАСТОСУВАННЯ ПРАВИЛ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ В ЗАДАЧІ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ АВІАЦІЙНОГО ДВИГУНА ТВ3-117

У роботі застосовується відомий підхід до побудови нечіткої експертної системи для оцінки технічного стану вузлів авіаційного двигуна ТВ3-117. Запропонований алгоритм контролю й діагностики технічного стану двигуна на основі модифікованого методу діагностичних матриць і правил нечіткої логіки. Розроблена інженерна методика може бути застосована на етапі льотної експлуатації авіаційного двигуна ТВ3-117.

Ключові слова: контроль, діагностика, нечітка логіка, база даних, авіаційний двигун.

Постановка проблеми. Безпека польотів повітряного судна – одна з проблем авіації, яка багато в чому залежить від надійності роботи двигунів. У наш час технічна діагностика авіаційних двигунів здійснюється тільки на землі інженерно-технічним персоналом, у розпорядженні якого є відповідні інструментальні засоби й методичний апарат. Надійна робота двигуна забезпечується цілим комплексом заходів, серед яких важливе місце відводиться ідентифікації його технічного стану. Оскільки більшість відмов, які впливають на безпеку експлуатації повітряного судна, зароджуються й проявляються саме в польоті, це вимагає наявності ефективної бортової системи ідентифікації технічного стану двигуна в режимі реального часу безпосередньо на борту повітряного судна. Труднощі діагностики авіаційного двигуна в автоматичному режимі в польоті пов'язані з високою складністю конструкцій авіаційних двигунів, зокрема й турбовального двигуна ТВ3-117, зумовленою багатопараметричністю,

багатопов'язаністю, нелінійністю процесів, що протікають у них, багаторежимністю застосування, що вимагає значних машинних і часових ресурсів. Тому розроблення інформаційної системи ідентифікації показників технічного стану двигуна ТВ3-117 є актуальною науково-практичною задачею.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Нині проблематикою інформаційної діагностики авіаційної техніки активно займаються вчені Московського державного технічного університету цивільної авіації (МДТУ ЦА), серед яких варто виділити роботи професора О.Ф. Машошина [1–3], в яких застосовані різні методики визначення несправностей авіаційної техніки, зокрема й авіаційних двигунів. Велика увага приділялася методам діагностики авіаційної техніки з позиції інформативності й інформаційного забезпечення процесів її діагностування.

Також варто відзначити роботи професора С.В. Жернакова (Уфімський державний авіацій-

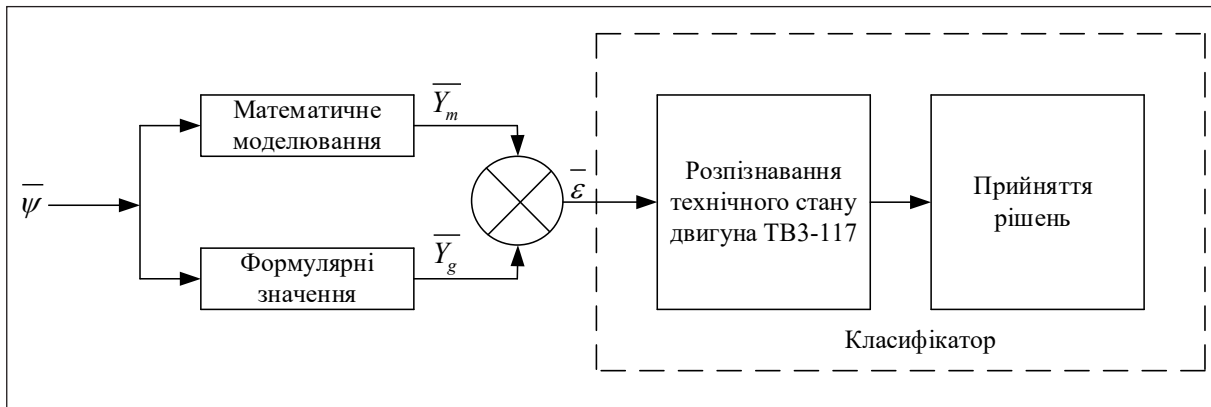


Рис. 1. Реалізація FDI-методу

ний технічний університет) [4–6], присвячені контролю й діагностиці технічного стану авіаційних газотурбінних двигунів на основі інтелектуального аналізу даних.

Незважаючи на значний обсяг досліджень у зазначених галузях, інформаційні технології ідентифікації технічного стану авіаційних двигунів не є досконалими з низки причин, основними з яких є, з одного боку, роз'єднаність баз даних випробувань, контролю та діагностики, відсутність інтелектуальних компонентів, що дозволяють якісно й ефективно здійснювати підтримку прийняття відповідальних рішень і зменшувати загальний час, що витрачається на обслуговування двигуна, а з іншого боку – нестаціонарність фізичних процесів в авіаційному двигуні, складність його математичного опису, залежність технічних характеристик двигуна від зовнішніх умов роботи, обмежений склад вимірюваних газодинамічних параметрів двигуна тощо. Зазначені фактори призводять до необхідності прийняття рішень про технічний стан двигуна в умовах істотної невизначеності [7].

Постановка завдання. Ефективний інструмент для подібного моделювання дає теорія нечітких множин. Наразі нечітка логіка розглядається як стандартний метод моделювання та проектування. Системи на нечітких множинах розроблені й успішно впроваджені в таких галузях, як медична діагностика, технічна діагностика, фінансовий менеджмент, управління персоналом, біржове прогнозування, розпізнавання образів, виявлення шахрайства, управління комп'ютерними мережами, управління технологічними процесами, управління транспортом, логістика, пошук інформації, радіозв'язок та телебачення. Спектр додатків дуже широкий: від побутових відеокамер, пилососів і пральних

машин – до засобів наведення ракет протиповітряної оборони й управління бойовими вертольотами й літаками. Практичний досвід розроблення систем на нечітких множинах свідчить, що терміни й вартість їх проектування значно нижчі, ніж під час використання традиційного математичного апарату. При цьому забезпечуються необхідні рівні якості [8].

Виклад основного матеріалу дослідження. В основу ідеології інформаційної системи ідентифікації показників технічного стану двигуна ТВ3-117 пропонується покласти використання методу FDI (Fault Detection and Identification), який базується на порівнянні результатів вимірювань газодинамічних показників у режимі реального часу з формулярними [9].

На рис. 1 позначено так: $\bar{\psi}$ – вектор керуючих впливів; \bar{Y}_m – вектор параметрів, отриманих за результатами математичного моделювання газодинамічних процесів у режимі реального часу; \bar{Y}_g – вектор формулярних значень газодинамічних показників; $\bar{\varepsilon} = \bar{Y}_g - \bar{Y}_m$ – незв'язування, яке отримане у процесі покомпонентного порівняння векторів \bar{Y}_g і \bar{Y}_m .

У процесі реалізації цього методу необхідно вирішити такі задачі:

- розроблення й програмна реалізація моделі авіаційного двигуна;
- обчислення незгодженості (незв'язування) і розпізнавання технічного стану двигуна;
- прийняття рішення про технічний стан авіаційного двигуна.

При цьому процес розпізнавання технічного стану та прийняття на підставі цього відповідного рішення в сукупності виконує функцію класифікатора.

У роботі пропонується алгоритм вирішення задач ідентифікації технічного стану авіаційного двигуна ТВ3-117 за результатами моделювання

газодинамічних процесів із використанням експертної системи, що включає в себе виконання такої послідовності кроків:

- формалізація й адаптація компонентної семантичної моделі двигуна в середовищі бази концептуальних знань;
- формалізація й адаптація методу діагностування в середовищі експертної системи;
- розроблення інтерфейсу між базою даних випробувань і внутрішньою базою даних на основі імпорту – експорту файлів;
- розроблення (наповнення) баз експертних знань шляхом вирішення «прямих» завдань ідентифікації (побудова причинно-наслідкових зв'язків у вигляді продукцій-правил);
- розроблення (наповнення) експертних баз знань шляхом розв'язання обернених задач ідентифікації (за результатом знайти причину);
- розроблення баз нечітких правил у середовищі баз концептуальних знань;
- приведення векторів розрахункових (за моделлю) і формулярних параметрів до відносних одиниць (нормування);
- покомпонентне порівняння векторів розрахункових і формулярних параметрів двигуна (визначення його технічного стану);
- прийняття рішення (вироблення рекомендацій) про подальшу експлуатацію двигуна.

Під час реалізації запропонованого методу в середовищі експертної системи можна використовувати підхід до адаптації математичної моделі авіаційного двигуна в базі знань до індивідуального авіаційного двигуна (з урахуванням даних, що характеризують його паспортні значення), але при цьому необхідний аналіз значних обсягів апріорної інформації, пов'язаної з випробуваннями й експлуатацією подібних діагностованих двигунів.

Налаштування (підгонка коефіцієнтів) математичної моделі на індивідуальний двигун передбачає використання методу порівняння [10], суть якого полягає в мінімізації незв'язувань між формулярними параметрами й параметрами, обчисленими за математичною моделлю, шляхом послідовних ітерацій (налаштування коефіцієнтів поправок для всіх вимірюваних і обчислюваних величин).

Послідовність кроків, характерних для адекватного уявлення середньостатистичної математичної моделі в середовищі бази знань пропонованої експертної системи, є такою.

1. Результати випробувань декількох бездефектних двигунів із парку двигунів подаються для ідентифікації математичної моделі, отриманої на

основі теоретичних описів робочого процесу в двигуні.

2. Проводиться ідентифікація математичної моделі за результатами випробування її фізичного аналога (варійовані параметри при цьому є параметрами стану).

3. Отримані під час ідентифікації за результатами випробувань двигуна ТВ3-117 значення параметрів стану розглядаються як випадкова вибірка з генеральної сукупності (для кожного параметра стану знаходиться математичне очікування, дисперсія й інші статистичні оцінки, аналіз яких дозволяє виявити грубі помилки й оцінити можливі межі зміни параметрів стану для бездефектного двигуна).

4. Математичні сподівання параметрів стану включаються в масив вихідної інформації для еталонної середньостатистичної математичної моделі бездефектного двигуна.

5. Проводиться класифікація можливих дефектів для всіх вузлів двигуна окремо й визначаються параметри стану, що змінюються в результаті появи цих дефектів (оскільки різні несправності можуть призводити до зміни одного й того самого параметра стану, вони об'єднуються в групи); для кожного з параметрів намічаються межі, які означають появу того чи іншого дефекту.

6. На математичній моделі газодинамічних процесів двигуна ТВ3-117 за необхідністю імітуються різні дефекти шляхом зміни параметрів стану й розраховуються відповідні їм ознаки стану (пряма задача).

7. Проводиться ідентифікація математичної моделі газодинамічних процесів двигуна ТВ3-117 у рамках FDI-методу за результатами випробування діагностованого двигуна, при цьому вхідною інформацією для ідентифікації є ознаки стану, виміряні під час випробувань (відомості з бази даних випробувань), а вихідною інформацією – параметри стану (зворотна задача); отримані значення параметрів стану порівнюються з формулярними значеннями цих параметрів для бездефектного двигуна, а в результаті робиться висновок про наявність відповідних несправностей.

Для підвищення точності ідентифікації параметрів технічного стану двигуна ТВ3-117 за розробленою математичною моделлю можна використовувати два підходи:

- по-перше, математичну модель можна замінити індивідуальною, тобто для кожного екземпляра двигуна корегувати еталонну модель шляхом ідентифікації останньої за результатами поточних випробувань (уточнюються параметри стану, які

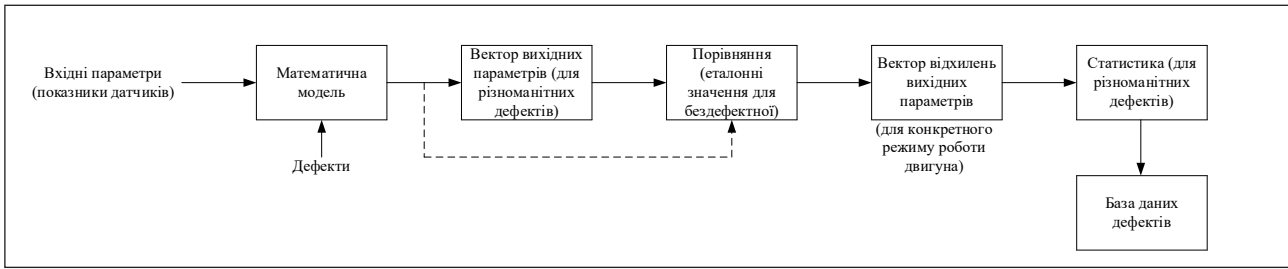


Рис. 2. Схема процесу формування бази даних дефектів

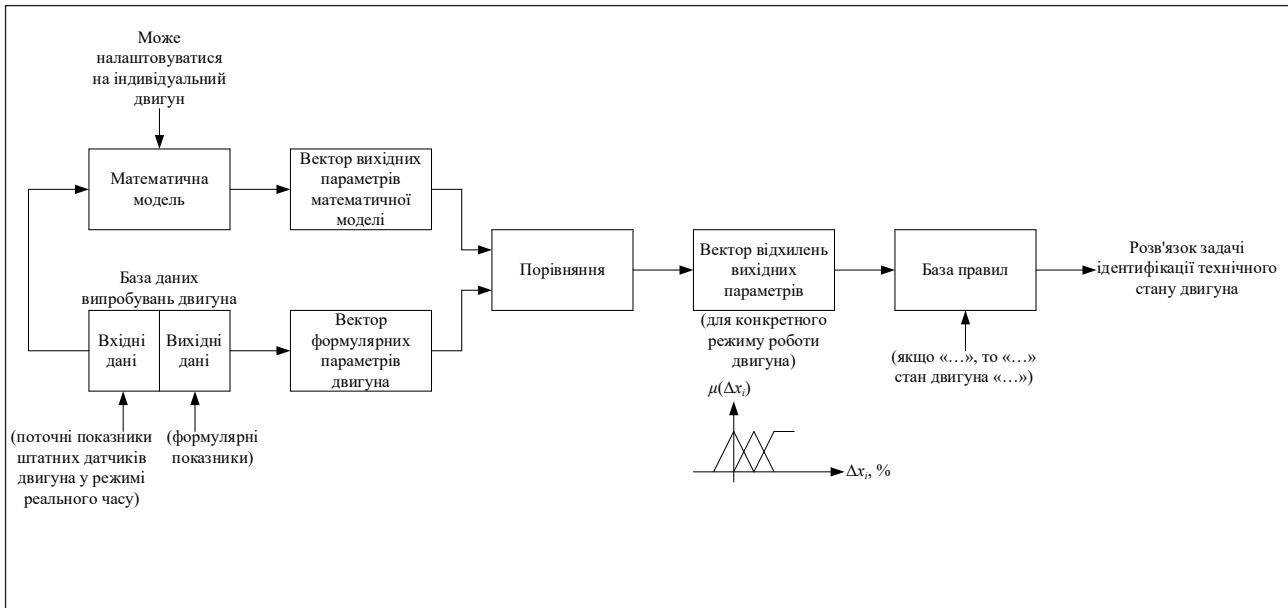


Рис. 3. Схема реалізації FDI-методу в середовищі експертної системи з прийняттям рішення на основі нечіткої логіки

будуть індивідуальними, а отже, і більш надійними);

– по-друге, замість постійних меж параметрів стану можна використовувати змінні, що враховують дрейф цих меж з урахуванням зносу й старіння двигуна, застосовуючи елементи нечіткої логіки.

Критерії ефективності ідентифікації математичної моделі авіаційного двигуна ТВ3-117 в середовищі експертної системи можуть бути представлені у такому вигляді [11]:

$$\delta_p = \frac{1}{m_z} \sum_{ij} (P_{I_i} - P_{M_i})^2; \quad (1)$$

де P_{I_i} , P_{M_i} – відповідно виміряні в режимі реального часу й формулярні значення параметрів авіаційного двигуна ТВ3-117; $I = \overline{1, m}$, де m – число виміряних параметрів двигуна; $i = \overline{1, n}$, де n – число формулярних параметрів двигуна.

Компонентна математична модель у розрахунково-логічній експертній системі в узагальненому вигляді може бути представлена так:

$$Z_{\xi, k}^*(t) = P_{\xi, k}(\tilde{Z}_{\xi}(t), R_k, Q_k, S_k, T_k); \quad (2)$$

де $Z_{\xi, k}^*(t)$ – вектор вихідних параметрів, обчислених за компонентною математичною моделлю; $\tilde{Z}_{\xi}(t)$ – вектор вхідних впливів, що задає режим роботи двигуна; $\xi = \overline{1, \varepsilon}$; $R_k = \{R_1, R_2, \dots, R_k\}$ – множина компонентів, що входять до складу математичної моделі й знаходяться в концептуальній базі знань експертних систем, які характеризуються k поєднанням в узагальненій семантичній мережі; $k = \overline{1, K}$; Q_k – оператор перетворення вектора вхідних впливів на вектор вихідних параметрів, які розраховуються за обчислювальною моделлю; S_k – рівняння зв'язку для побудови компонентної моделі (визначення сполучних змінних окремих компонентів); T_k – тривалість функціонування.

На рис. 2 наведено процес формування (наповнення) баз даних дефектів, а також реалізацію FDI-методу в середовищі експертної системи, при цьому в процесі формування бази даних дефектів мається на увазі, що користувач попе-

Порівняльний аналіз ефективності ідентифікації параметрів технічного стану двигуна

Метод [12]	Імовірність розпізнавання стану двигуна				P_{Σ}^N	P_{Σ}^H	δ
	P_i^N	P_i^H	P_i^N	P_i^H			
Діагностичних матриць	1,0	0	0,9	0,1	0,95	0,05	1,0
Розв'язку системи нормальних рівнянь	1,0	0	0,8	0,2	0,90	0,1	2,0
Нелінійної оптимізації критерію технічного стану	1,0	0	0,9	0,1	0,95	0,05	1,0
Порівняння на основі МНК	0	1,0	0	1,0	0	1,0	4,0
Порівняння на основі МНМ	0,6	0,4	0,23	0,77	0,415	0,585	3,0

редньо «налаштував» сформовану ним з окремих понять (компонентів) у концептуальній базі знань математичну модель на індивідуальний двигун. У процесі роботи із цією компонентною математичною моделлю він на етапі її адаптації в середовищі експертної системи за відомими вхідних параметрів формує еталонний вектор даних, що характеризують бездефектний стан останньої. Еталонний вектор даних зберігається у вбудованій базі даних експертної системи у вигляді атрибутів значення. Далі вирішується «пряма» задача: за відомим дефектом знаходяться відхилення від еталонного стану. Для цього користувачем до компонентів математичної моделі вносяться характерні дефекти. Розрахунки, проведені ним за математичною моделлю з попередньо внесеними дефектами, формують на її виході відповідний вектор параметрів, порівняння якого з еталонним дає вектор відхилень (факти), що в якості статистичного матеріалу заповнює базу даних дефектів.

Реалізація FDI-методу в середовищі експертної системи, яка наведена на рис. 3, передбачає вирішення «оберненої задачі»: за вектором відхилень на конкретному режимі роботи двигуна здійснюється ідентифікація дефекту з прийняттям відповідного рішення. Для цього дані з бази даних випробувань двигуна (вхідні параметри) подаються на вхід компонентної математичної моделі, а потім порівнюються вектори вихідних параметрів моделі, які отримуються із поточних показників штатних датчиків двигуна в режимі реального часу й формулярних показників, попередньо оброблених і записаних у базу даних випробувань. У результаті виходить вектор відхилень, аналіз якого базою нечітких правил експертних систем формує відповідне рішення про фактичний технічний стан авіаційного двигуна з рекомендаціями щодо його експлуатації. Таким чином, розроблена математична модель газодинамічних процесів двигуна є інформаційним

каналом для передачі діагностичної інформації щодо його технічного стану.

Алгоритм ідентифікації параметрів технічного стану авіаційного двигуна ТВ3-117 полягає в такому: $\{Y\}$ – множина можливих технічних станів авіаційного двигуна, характеризується підмножинами $y_j \in Y$ еталонних векторів ідентифікаційних ознак \widehat{F}_i (j – порядковий номер технічного стану; i – порядковий номер еталонного вектора технічного стану: $\widehat{F}_i \in Y$, де $i = 1 \dots N$ – загальне число еталонних векторів, які становлять множину технічних станів двигуна Y).

Передбачається, що узагальнена лінійна функція, що відділяє одну з підмножин y_j технічного стану двигуна від сукупності всіх інших підмножин його технічного стану, має такий вигляд:

$$L_j = \sum_{n=1}^N d_n f(F_i, \widehat{F}_n); \quad (3)$$

$$\text{де } d_n = \begin{cases} 1, & \text{якщо } \widehat{F}_i \in y'_j \\ -1, & \text{якщо } \widehat{F}_i \notin y'_j \end{cases}, f(F_i, \widehat{F}_n) = e^{-\|F_i - \widehat{F}_n\|^2}, y'_j \in y' -$$

редукована множина технічних станів двигуна, отримана з початкової множини Y шляхом відбору його елементів (еталонних векторів \widehat{F}_i).

Для вектора \widehat{F}_i із множини Y установлюється однозначний йому вектор \widehat{F}_n множини y' $\widehat{F}_i \equiv \widehat{F}_n$ тільки тоді, коли величина τ_i , що розраховується за рекурентним співвідношенням, відмінна від нуля:

$$\tau_i = \frac{1}{2} b_i \left\{ 1 - b_i \operatorname{sgn} \left(a \left(\widehat{F}_{i-1} \right) \right) \right\}; \quad (4)$$

де

$$a \left(\widehat{F}_{i-1} \right) = a \left(\widehat{F}_{i-2} \right) + \tau_{i-1} e^{-\|F_i - \widehat{F}_{i-1}\|^2},$$

$$a \widehat{F}_i = e^{-\|F_i - \widehat{F}_i\|^2}, b_i = \begin{cases} 1, & \text{якщо } \widehat{F}_i \in y'_j \\ -1, & \text{якщо } \widehat{F}_i \notin y'_j \end{cases},$$

$$\operatorname{sgn} \left(a \widehat{F}_{i-1} \right) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } a \left(\widehat{F}_{i-1} \right) > 0 \\ -1, & \text{якщо } a \left(\widehat{F}_{i-1} \right) \leq 0 \end{cases}.$$

Вирішальне правило розпізнавання j -го технічного стану двигуна має такий вигляд:

- якщо $L_j > 0$, то вектор вимірних параметрів F_j відповідає j -му технічному стану двигуна;
- якщо $L_j < 0$, то вектор вимірних параметрів F_j не відповідає j -му технічному стану двигуна;
- якщо $L = 0$, то технічний стан двигуна не визначений.

Запропонований спосіб розв'язку задач ідентифікації технічного стану авіаційного двигуна ТВ3-117 на основі FDI-методу передбачає (на відміну від класичних методів, які використовують жорсткі допуски на контрольовані й ідентифіковані параметри, а також жорсткі межі варіювання коефіцієнтів, що погоджує експериментальні та розрахункові дані на етапах локалізації дефектів у двигуні) застосування правил нечіткої логіки, заснованих на адаптації розрахункової математичної моделі реального двигуна з урахуванням конкретних зовнішніх умов, а також знань і досвіду експертів для прийняття правильних рішень про технічний стан двигуна.

Ефективність ідентифікації технічного стану двигуна ТВ3-117 у рамках FDI-методу багато в чому залежить від ефективності використовуваного методу [12]: діагностичних матриць, розв'язку системи нормальних рівнянь, нелінійної оптимізації критерію технічного стану, порівняння на основі методу найменших квадратів (далі – МНК), порівняння на основі методу найменших модулів (далі – МНМ).

Порівняльний аналіз ефективності ідентифікації параметрів технічного стану двигуна (за умови прийняття гіпотези про найбільш імовірне виникнення дефекту в обмеженій кількості вузлів) під час використання методу діагностичних матриць і інших методів наведений у табл. 1.

У табл. 1 P_i^n , P_i^H – імовірність правильного й помилкового розпізнавання стану двигуна ($i = 1, 2$); $P_{\Sigma}^n = \frac{1}{2} \sum P_i^n$; $P_{\Sigma}^H = \frac{1}{2} \sum P_i^H$; δ – оцінка ефективності методу в балах, причому при $\delta = 1$ – найвища ефективність, при $\delta = 4$ – найнижча ефективність.

Аналіз ефективності ідентифікації параметрів технічного стану авіаційного двигуна ТВ3-117 методами, наведеними в табл. 1, показує, що 100% розпізнавання двигуна забезпечується трьома першими методами за наявності одного дефектного вузла. Якщо таких вузлів два, то 100% розпізнавання не забезпечується жодним із методів. Застосування в експертній системі баз нечітких правил підвищує достовірність правильної ідентифікації технічного стану двигуна.

Таким чином, метод ідентифікації параметрів технічного стану авіаційного двигуна ТВ3-117 і його підсистем на базі експертної системи має певні кроки.

1. Формалізація й адаптація компонентної математичної моделі двигуна та її підсистем у базі концептуальних знань.

2. Налаштування математичної моделі та її підсистем на індивідуальний або середній у парку двигун (підсистему).

3. Формування графі причинно-наслідкових зв'язків.

4. Імітація дефектів на математичній моделі (отримання векторів вихідних параметрів для різних проявів дефектів).

5. Отримання вектора відхилень (у процесі покомпонентного порівняння між векторами вихідних параметрів для різних дефектів і формулярних значень для бездефектної математичної моделі).

6. Формування бази нечітких правил на основі аналізу статистики проявів різних відмов.

7. Тестування бази знань експертної системи.

8. Розв'язання задачі ідентифікації параметрів технічного стану авіаційного двигуна ТВ3-117 і його підсистем (класифікація відмов, прийняття рішення про технічний стан двигуна та його підсистем).

Висновки. У роботі запропоновано метод побудови математичної моделі авіаційного двигуна ТВ3-117 на основі розширеної семантичної мережі, що дозволяє шляхом реконфігурації математичної моделі й адаптації її характеристик до індивідуального двигуна вирішувати широкий спектр задач контролю та діагностики технічного стану авіаційного двигуна; алгоритм контролю й діагностики технічного стану авіаційного двигуна ТВ3-117 на основі модифікованого методу діагностичних матриць і правил нечіткої логіки, застосування якого дозволяє ефективно і якісно здійснювати ідентифікацію технічного стану авіаційного двигуна ТВ3-117.

Застосування методів теорії нечітких множин для ідентифікації математичних моделей авіаційного двигуна ТВ3-117 є подальшим розвитком напряму математичного моделювання авіаційних двигунів.

Елементи нечіткої логіки доцільно використовувати спільно з нейронними мережами. Тому з'являється перспектива розвитку апарата гібридних мереж, в яких висновки робляться на основі апарата нечіткої логіки, але відповідні функції приналежності налаштовуються з використанням алгоритмів навчання нейронних мереж. Такі системи не тільки використовують апріорну інформацію, але й можуть набувати нові знання, а для користувача є логічно прозорими. На їхній основі можна робити нечіткі експертні та керуючі системи адаптивними, корегуючи по мірі роботи системи правила й параметри функцій приналежності.

Список літератури:

1. Машошин О.Ф., Зонтов Г.С. Диагностика авиационного газотурбинного двигателя по наличию вредных примесей в системе кондиционирования воздуха. Научный вестник МГТУ ГА. 2014. № 205. С. 44–48.
2. Машошин О.Ф. Оценка диагностической ценности информации при решении задач в области эксплуатации авиационной техники. Научный вестник МГТУ ГА. 2015. № 219. С. 53–56.
3. Машошин О.Ф., Кармызов М.В., Макаров В.П. Алгоритм оценки вибросостояния газотурбинных двигателей с использованием элементов теории математической статистики. Научный вестник МГТУ ГА. 2008. № 135. С. 28–33.
4. Жернаков С.В. Тренд-анализ параметров авиационного ГТД на основе технологии нейронных сетей. Вестник УГАТУ. 2011. Т. 15. № 4 (44). С. 25–32.
5. Жернаков С.В., Иванова Н.С., Равилов Р.Ф. Контроль и диагностика технического состояния масляной системы ГТД с использованием технологии нейронных сетей. Вестник УГАТУ. 2012. Т. 16. № 2 (47). С. 210–220.
6. Жернаков С.В., Васильев В.И., Муслухов И.И. Бортовые алгоритмы контроля параметров ГТД на основе технологии нейронных сетей. Вестник УГАТУ. 2009. Т. 12. № 1 (30). С. 61–74.
7. Пивоваров В.А., Машошин О.Ф. Применение аппарата теории статистической классификации к задачам диагностирования авиационной техники. Научный вестник МГТУ ГА. 1999. № 20. С. 25–30.
8. Єнчев С.В., Товкач С.С. Діагностування технічного стану авіаційних двигунів на основі нечіткої логіки. Науковий вісник Херсонської державної морської академії. 2013. № 1 (8). С. 216–224.
9. Frank M.P. Ding S.X. Current developments in the theory of FDI. Preprints of the 4th IFAC Symposium on Fault Detection Supervision and Safety for Technical Processes. 2000. Vol. 1 Pp. 16–27.
10. Таран Е.М. Универсальный метод согласования математической модели ГТД с результатами испытаний. Испытания авиационных двигателей. 1986. № 14. С. 63–70.
11. Дегтярев Ю.Д., Гумеров Х.С., Юлдыбаев Л.Х. Сравнение методов идентификации математических моделей ГТД. Испытания авиационных двигателей. 1981. № 9. С. 98–104.
12. Гишваров А.С., Приб И.В., Жернаков В.С. Математическое моделирование рабочих процессов газотурбинных энергетических установок. Труды АН Республики Башкортостан. Отделение «технические науки». 2002. С. 212–229.

ПРИМЕНЕНИЕ ПРАВИЛ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ В ЗАДАЧАХ ИДЕНТИФИКАЦИИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ АВИАЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ТВ3-117

В работе применяется известный подход построения нечеткой экспертной системы для оценки технического состояния узлов авиационного двигателя ТВ3-117. Предложен алгоритм контроля и диагностики технического состояния двигателя на основе модифицированного метода диагностических матриц и правил нечеткой логики. Разработанная инженерная методика может быть применена на этапе летной эксплуатации авиационного двигателя ТВ3-117.

Ключевые слова: контроль, диагностика, нечеткая логика, база данных, авиационный двигатель.

APPLICATION OF THE RULES OF URBAN LOGIC IN THE PROBLEM OF IDENTIFICATION OF THE TECHNICAL STATE OF THE AVIATION ENGINE TV3-117

The well-known approach to building a fuzzy expert system for assessing the technical state of the aviation engine nodes TV3-117 is used in the work. The algorithm of control and diagnostics of the technical condition of the engine based on the modified method of diagnostic matrices and rules of fuzzy logic is proposed. The developed engineering technique can be applied at the stage of flight operation of aviation engine TV3-117.

Key words: control, diagnostics, fuzzy logic, database, aviation engine.

УДК 681.51

Юськів А.С.

Одеський національний політехнічний університет

Харабет О.М.

Одеський національний політехнічний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ВВЕДЕННЯМ У ЦЕМЕНТНУ ПІЧ ДОДАТКОВОГО ПАЛИВА, ВИРОБЛЕНОГО З ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ ЯК ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОГО Й ЕКОЛОГІЧНОГО ЗАСОБУ ОДНОЧАСНО

У статті розглянуто можливість модернізації процесу вироблення цементного клінкеру шляхом часткової заміни природного газу на тверде відновлюване паливо, отримане з побутових відходів. Синтезовано та досліджено математичну модель системи автоматичного регулювання співвідношення «тверде паливо – газове паливо».

Ключові слова: виробництво цементу, обертова піч, клінкер, тверде відновлюване паливо, система автоматичного регулювання.

Постановка проблеми. Україна має всі шанси посісти одне з провідних місць на європейському ринку виготовлення будівельних матеріалів, а саме в цементній промисловості.

Цементна промисловість потребує великої кількості палива, головно природного газу. Питома вага газу в собівартості клінкеру складає зазвичай 60–70% [1]. Щоб знизити витрати на виробництво клінкеру, наші європейські сусіди навчилися використовувати в цементних печах альтернативні види палива, наприклад, SRF (solid recovered fuel) – тверде відновлюване паливо, отримане з твердих відходів. Спалювання такого виду додаткового палива разом із традиційним дасть значну економію при збереженні високої якості виготовленого цементу. Одночасно буде вирішуватися друга актуальна проблема – позбавлення населених пунктів від побутових відходів. Тому має сенс модернізувати цементні заводи шляхом використання в трубних обертових печах додаткового палива, виробленого з побутових відходів. Оскільки гранули додаткового палива не є рівномірними, виникає проблема їх автоматичного дозування перед введенням у піч.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Про можливість використання твердого відновлюваного палива в цементній промисловості було сказано в публікації [5]. У цій публікації розглянуті енергетичні й екологічні переваги й компроміси

відносно конверсії нерезициркуляційних пластмас і волокон, одержаних у колишніх споживачів пластмас, і волокон, отриманих із потоків залишків MRF, у SRF для використання в цементній печі. Але авторами не розглядалися як питання автоматичного управління режимами обертової печі, так і управління ділянкою одночасного спалення газу та гранул, вироблених із відходів.

Постановка завдання. Потрібно модернізувати процес вироблення цементного клінкеру шляхом часткової заміни природного газу на тверде відновлюване паливо, отримане з побутових відходів, вирішити проблеми, пов'язані зі зберіганням, дозуванням і перерозподілом між потоками палива – основного та додаткового. Таким чином, предметом дослідження є вирішення задач автоматичного управління дозуванням, вимірюванням потоку гранул і конструювання системи управління співвідношенням «тверде паливо – газове паливо».

Виклад основного матеріалу дослідження. На рис. 1 показано, яким чином здійснюється традиційне виготовлення цементного клінкеру в обертовій трубній печі. Компоненти, з яких має бути одержаний клінкер, подаються за допомогою дозаторів у підняту частину печі. Під дією власної ваги та пересипання в порожнині печі вони поступово пересуваються до її найбільш нагрітої частини – плавильної зони. Уздовж печі відбуваються

фізико-хімічні перетворення, у результаті яких мінерали втрачають структурну вологу. У плавильній зоні відбувається спалення основної частини природного газу. Тут розплавлений клінкер проходить кінцеву обробку, а далі витікає з печі, гранулюється в контакті з водою та прямує на осушення й подрібнення до стану цементу. Продукти

згоряння прямують до виходу з печі, поступово охолоджуючись. Далі вони проходять очищення від пилу та через димову трубу потрапляють в атмосферу. Температура в плавильній зоні печі є визначальною для якості клінкеру, тому вона ретельно вимірюється та підлягає регулюванню [1]. Традиційна технологія є досить збалансова-

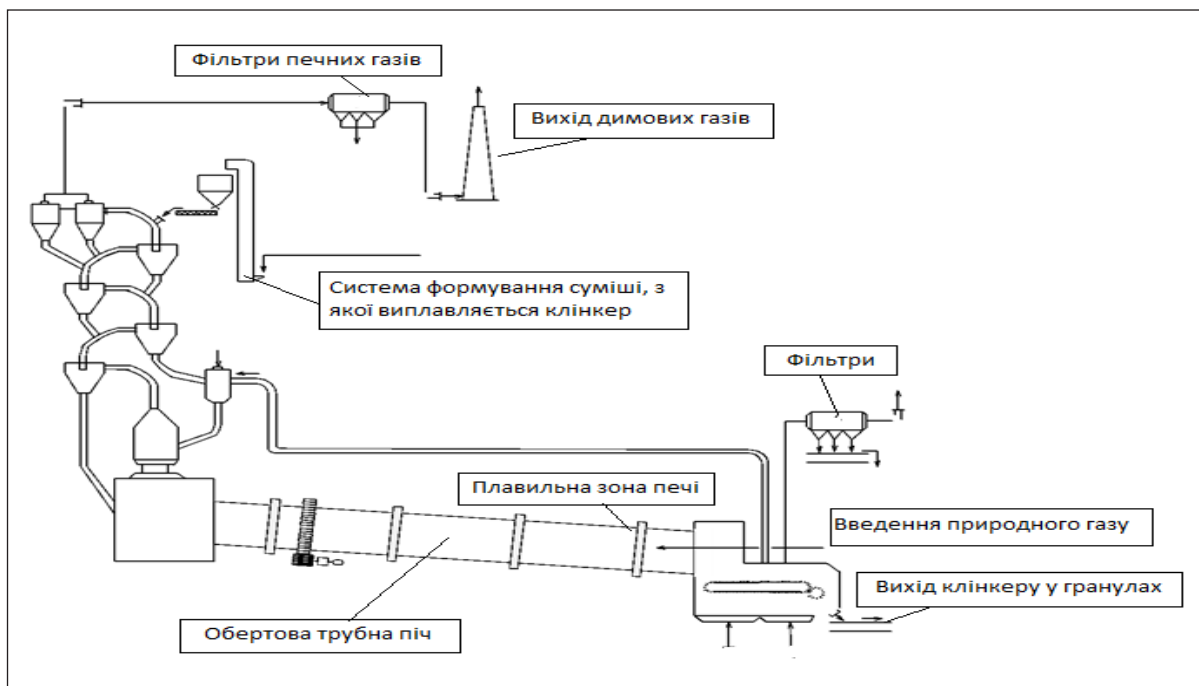


Рис. 1. Технологічна схема виплавляння клінкеру в обертовій трубній печі до модернізації

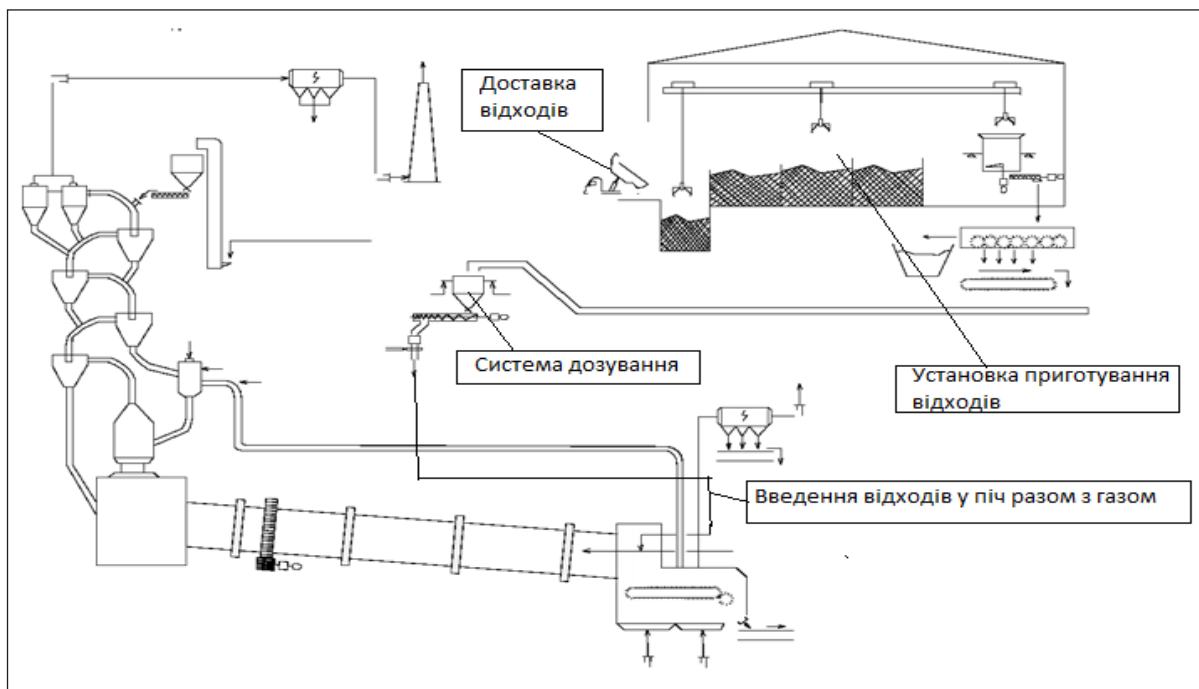


Рис. 2. Технологічна схема виплавляння клінкеру після модернізації.
Додаткові елементи: засоби доставки відходів; установка для приготування гранул із відходів; системи дозування та введення відходів в обертову піч

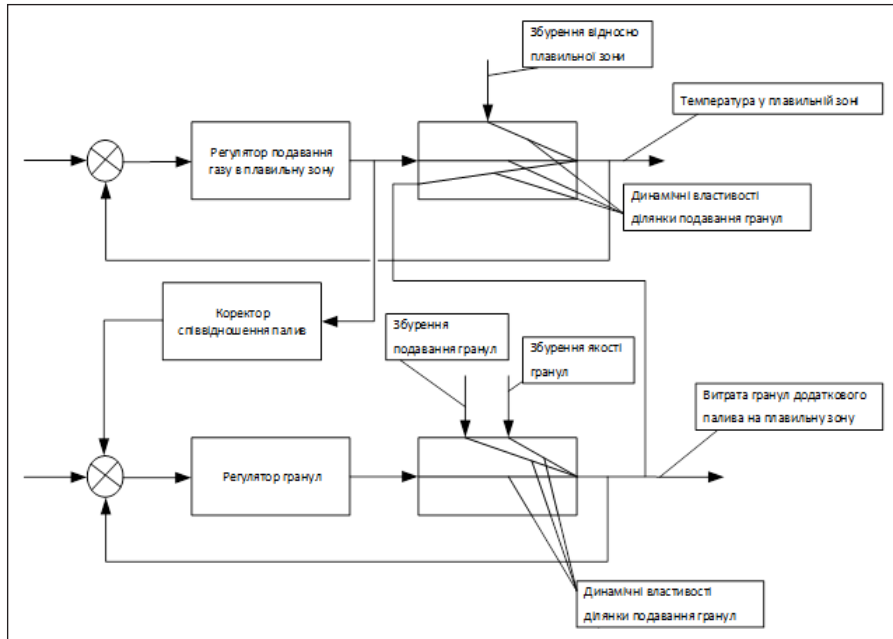


Рис. 3. Структура системи регулювання співвідношення «газ – гранули»

ною, але потерпає від постійного зростання цін на природний газ. Тому й була поставлена така задача – використати в якості додаткового палива побутові відходи.

Схема, яка реалізує цю ідею, зображена на рис. 2. Тут показані додаткові елементи, які необхідно додати до традиційної схеми. Вони виділені на рис. 2 відповідними написами. По-перше, це система, що забезпечує доставку та прийом побутових відходів, які пройшли попереднє сортування. На другому етапі відбувається виготовлення горючих гранул. Гранули потрапляють у бункер системи дозування, а далі транспортуються до зони спалення разом із відповідною кількістю підігрітого повітря [2].

Далі потрібно вирішити, яка структура системи управління співвідношенням «газ – гранули» потрібна для високоефективного вирішення поставленої задачі.

Для формулювання задачі регулювання співвідношення потрібно навести структуру системи, що має бути спроектована. Покажемо її на рис. 3.

Наведена система не потребує дослідження на стабільність, оскільки її склад не містить елементів із нетиповими для промисловості характеристиками. Подібні системи використовуються для регулювання співвідношення «паливо – повітря», де вони добре себе проявили. Відмінність полягає лише в тому, що гранули є паливом непостійного складу, отже, теплота горіння буде різною, тому потрібно вимірювати температуру в зоні спікання й робити поправку на регулятор подачі гранул.

Для того, щоб змоделювати співвідношення «газ – гранули», отримати криві розгону й перехідні процеси, потрібно знайти коефіцієнт передачі й постійні часу, представити їх у вигляді передаточних функцій.

Коефіцієнт передачі по каналу газу знаходимо за відношенням зміни температури до витрати газу. Потрібна температура в зоні спікання – 1300°C, норма витрати газу (орієнтовно) – 2000–2500 м³/год, максимальне відхилення подачі газу – 500 м³/год, відхилення температури – 50°C [1].

$$K_p = \frac{Y}{X} = \frac{(1300 - 50)}{(2500 - 500)} = 0.625 \frac{^\circ\text{C}}{\text{м}^3 / \text{год}}, \quad (1)$$

Також знайдемо постійну часу; оскільки процес горіння газу відбувається майже миттєво, то постійна часу дорівнює $T = 5$ с. Оскільки температура в камері вимірюється за допомогою пірометра, то він додасть інерційності цьому каналу. Це становитиме 5 с, плюс чисте запізнення – 2 с.

Тоді передаточна функція по каналу газу набуде такого вигляду:

$$W(s)_g = \frac{0.625}{5s + 1} \cdot e^{-7s}, \quad (2)$$

Канал збурення відносно плавильної зони: коефіцієнт передавання менший на 20%, а постійна часу – на 20% більше.

Коефіцієнт передачі по каналу гранули знайдемо також за відношенням зміни температури до витрати гранул. Витрата гранул (орієнтовно) – 3580 кг/год. При теплотворній здатності 20 МДж/кг максимальне відхилення подачі гранул беремо 580 кг/год [4].

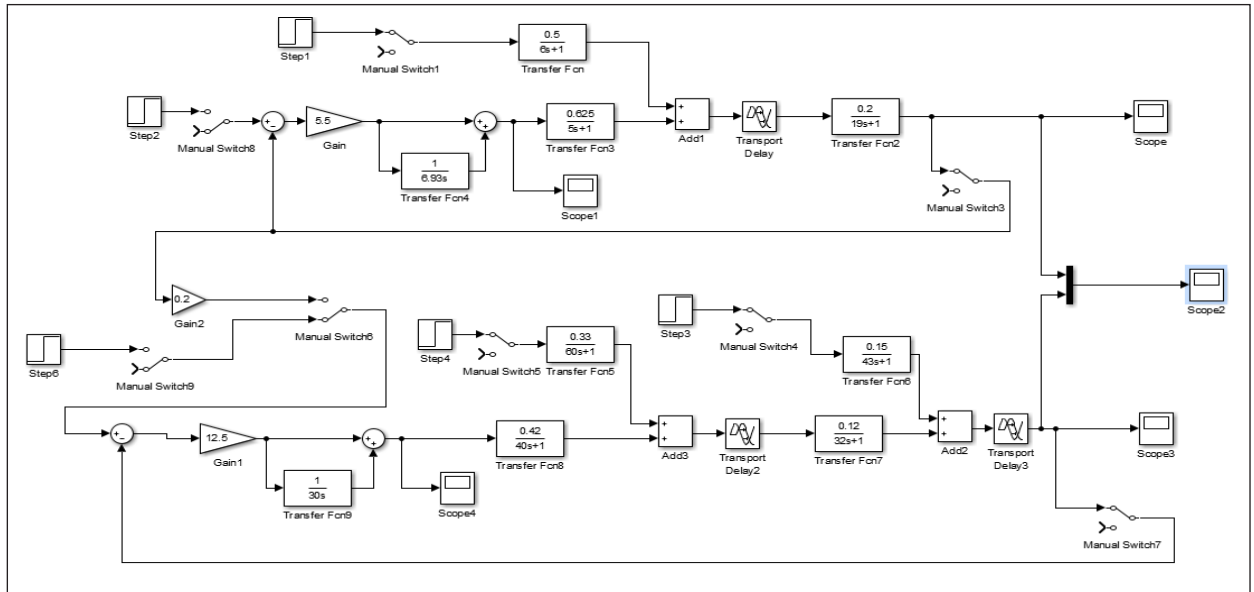


Рис. 4. Модель системи управління співвідношенням «газ – гранули»

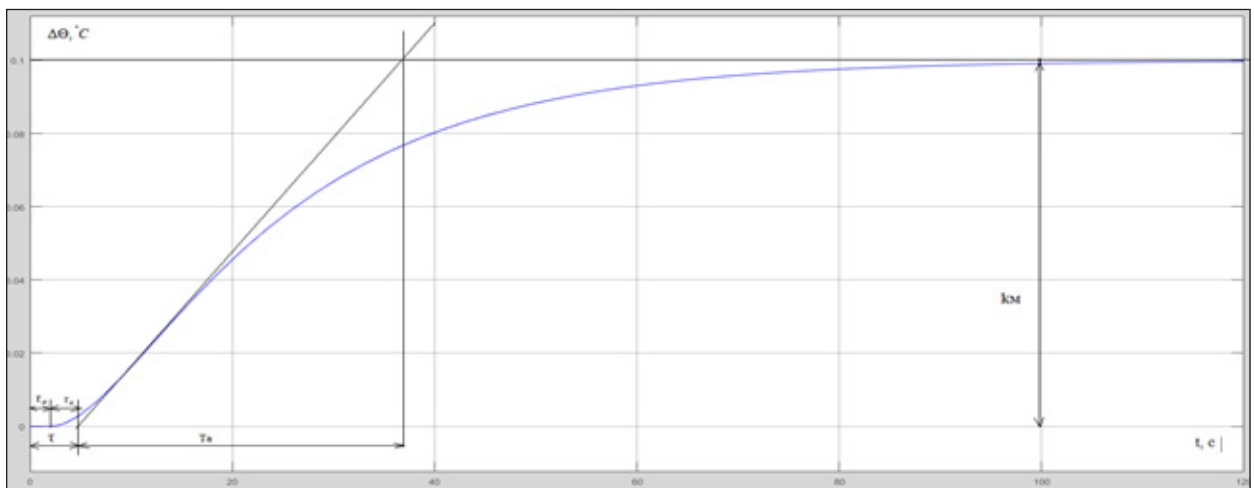


Рис. 5. Крива розгону по каналу подачі природного газу

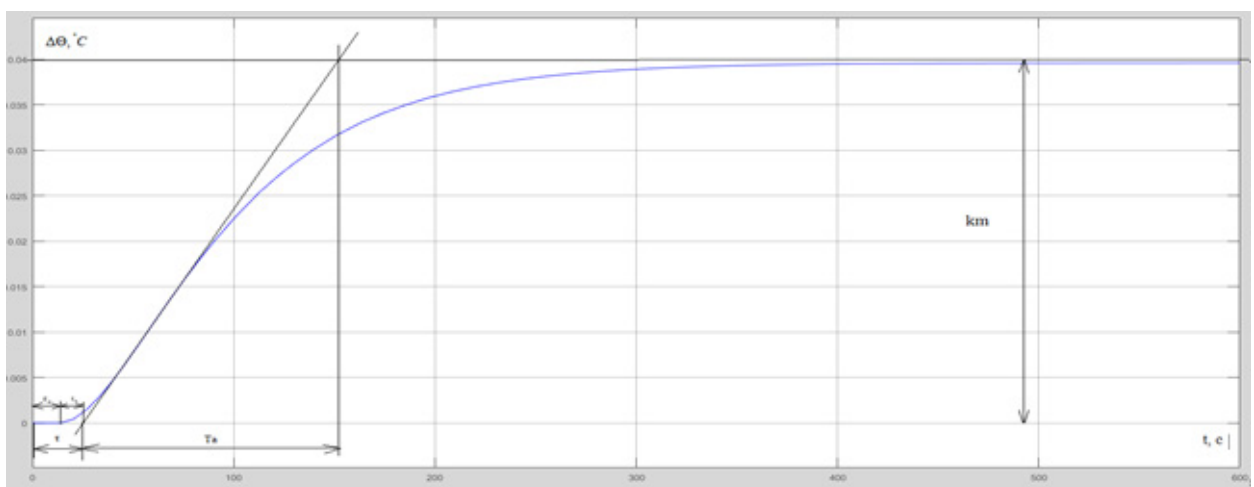


Рис. 6. Крива розгону по каналу подачі гранул, вироблених із відходів

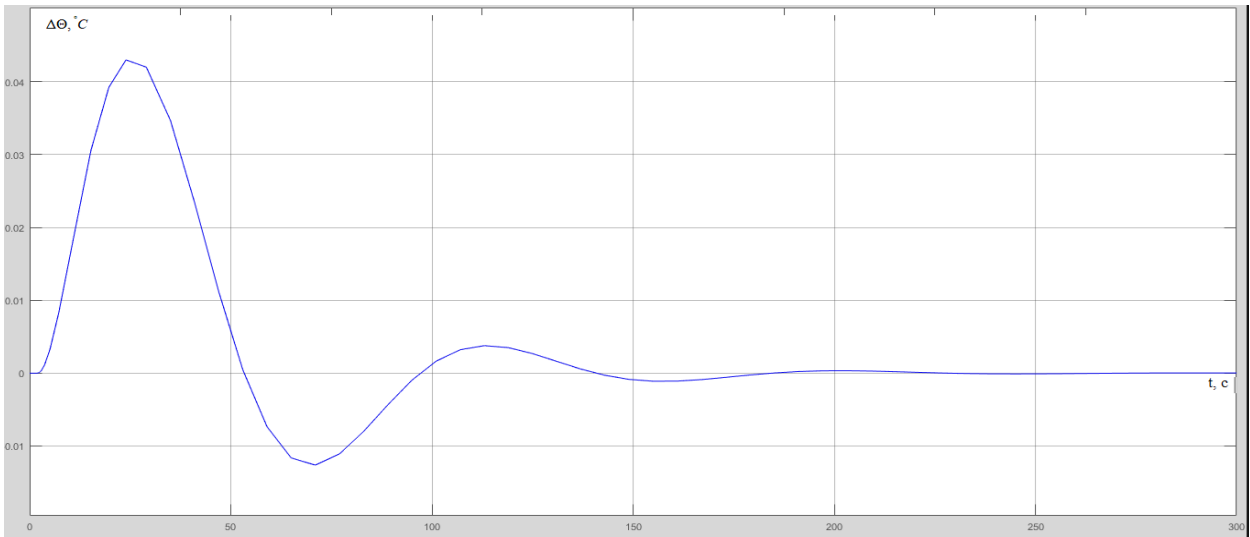


Рис. 7. Перехідний процес за каналом «витрати газу» – відхилення температури в плавильній зоні

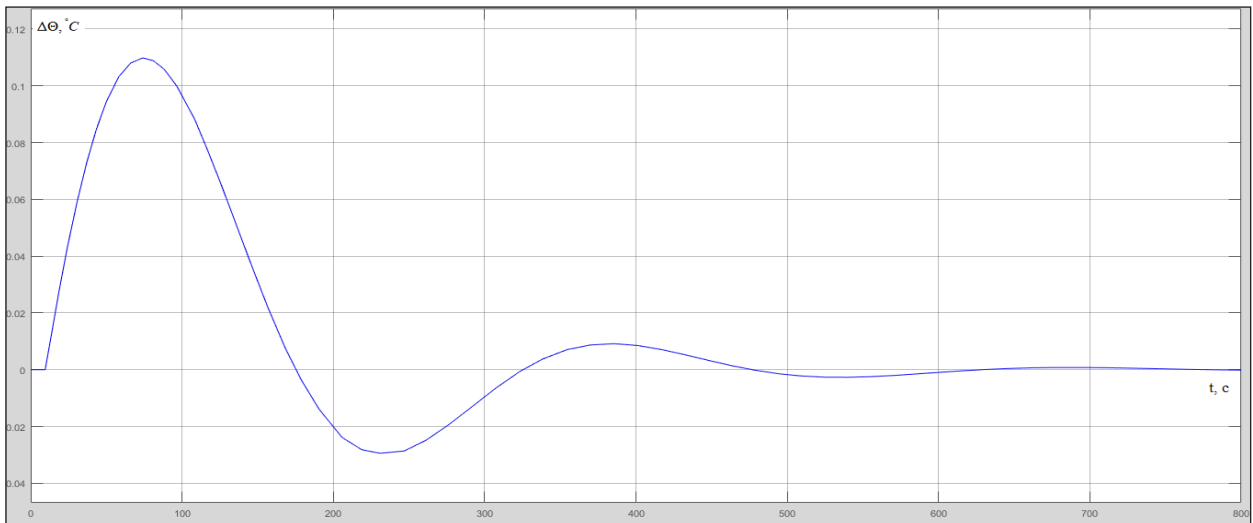


Рис. 8. Перехідний процес за каналом «витрати гранул» – відхилення температури в плавильній зоні

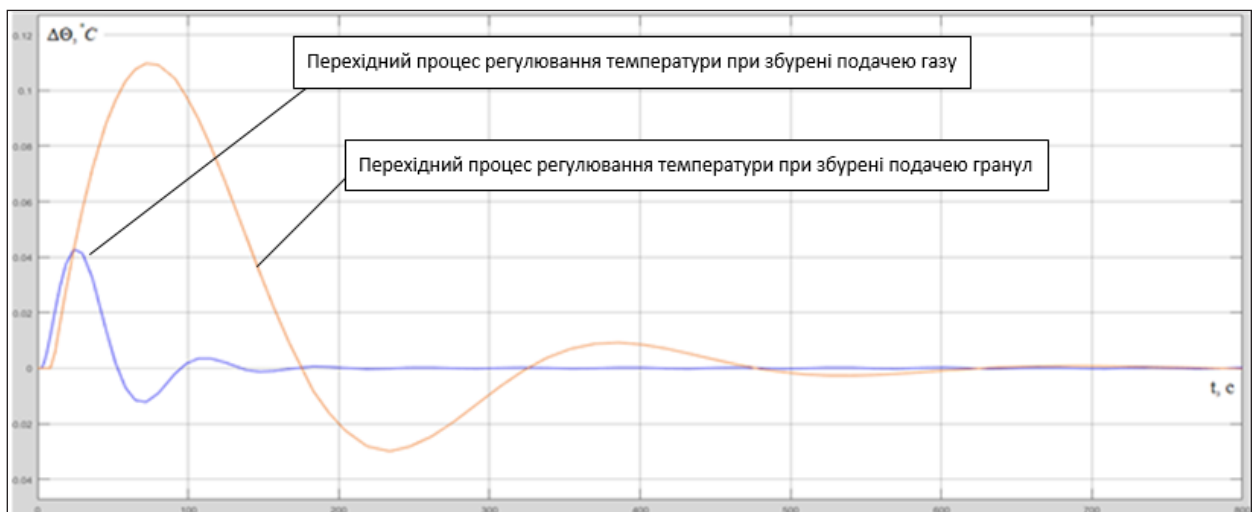


Рис. 9. Перехідні процеси за основними каналами регулювання температури в плавильній зоні обертової трубної печі

$$K_p = \frac{Y}{X} = \frac{(1300 - 50)}{(3580 - 580)} = 0.417 \frac{^\circ\text{C}}{\text{м}^3 / \text{год}}, \quad (3)$$

Процес подачі й горіння гранул відбувається не так швидко, постійна часу дорівнює $T = 40$ с. Витрата гранул вимірюється витратоміром на основі тензодатчика, інерційність цього каналу становить 10 с, плюс чисте запізнення – 4 с.

Передаточна функція по каналу гранул має такий вигляд:

$$W(s)_g = \frac{0.417}{40s + 1} \cdot e^{-14s}, \quad (4)$$

Для об'єкта управління синтезована система співвідношення «газ – гранули» в середовищі Simulink пакета MATLAB представлена на рис. 4.

Наступним етапом буде знаходження налаштувань регулятора за каналами газу й гранул методом Л. Кона [3].

Апроксимувавши криву розгону за каналами «газ – гранули» за методом Л. Кона, отримаємо оптимальні налаштування регуляторів [3]. Перехідні процеси представлені на рис. 7, 8, 9.

Висновки. Модернізовано схему автоматичного управління для процесу вироблення цементного клінкеру шляхом часткової заміни природного газу на тверде відновлюване паливо, отримане з побутових відходів. При цьому є можливість одержання значної економії у виготовленні цементного клінкеру достатньо високої якості. Для об'єкта управління синтезована система співвідношення «газ – гранули» в середовищі Simulink пакета MATLAB. Ця система може бути налагоджена традиційними методами. Одержані параметри налагодження можуть бути переведені у відповідні параметри для цифрових контролерів.

Список літератури:

1. Дуда В. Цемент. Электрооборудование, автоматизация, хранение, транспортирование / Сокр. пер. с англ. Р. Айтмуратова / под ред. Б. Юдовича, И. Прозорова. Москва, 1987. 464 с.
2. Болдырев, А., Хохлов В. Шляхи економії палива в цементній промисловості. Москва, 1983. 88 с.
3. Харабет О. Вивчення класичної теорії автоматичного управління за допомогою сучасного персонального комп'ютера: навч. посібник. Одеса: ОНПУ, 2014. 188 с.
4. EN 15359: 2011. Тверді відновлені види палива. Технічні характеристики та класи. Київ, 2016. 10 с. ГОСТ 33516-2015.
5. Fyffe J., Breckel A., Townsend A., and Webber M. Residue-Derived Solid Recovered Fuel for Use in Cement Kilns. Waste Management. 2015. 114 p.

ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВВЕДЕНИЕМ В ЦЕМЕНТНУЮ ПЕЧЬ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ТОПЛИВА, ПРОИЗВЕДЕННОГО ИЗ БЫТОВЫХ ОТХОДОВ, КАК ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО И ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СРЕДСТВА ОДНОВРЕМЕННО

В статье рассмотрена возможность модернизации процесса выработки цементного клинкера путем частичной замены природного газа на твердое восстанавливаемое топливо, полученное из бытовых отходов. Синтезирована и исследована математическая модель системы автоматического регулирования соотношения «твердое топливо – газовое топливо».

Ключевые слова: производство цемента, вращающаяся печь, клинкер, твердое восстанавливаемое топливо, система автоматического регулирования.

INVESTIGATION OF THE CONTROL SYSTEM OF THE INTRODUCTION TO CEMENT FURNACE OF ADDITIONAL FUEL PRODUCED FROM DOMESTIC WASTE, HOW ENERGY-EFFICIENT AND ENVIRONMENTAL RESOURCE SIMULTANEOUSLY

The article considers the possibility of modernizing the process of production of cement clinker by partial replacement of natural gas for solid renewable fuel, obtained from household waste. The mathematical model of the system of automatic regulation of ratio “solid fuel – gas fuel” is synthesized and investigated.

Key words: cement production, rotating furnace, clinker, solid regenerative fuel, automatic control system.

Яременко В.С.

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

ОГЛЯД НАЯВНИХ МУЛЬТИАГЕНТНИХ СИСТЕМ ДЛЯ ЗАДАЧ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ДАНИХ

Проведено аналіз мультиагентних систем глибинного аналізу великих об'ємів даних, що були розглянуті як сукупність інтелектуальних агентів і зв'язків між ними. Показано, що процес аналізу включає сукупність етапів з інтеграції даних, попереднього опрацювання даних, класифікації даних, кластеризації даних, визначення асоціативних правил і представлення даних у формі бази знань. У роботі проведено дослідження з побудови методологічних основ визначення функціональності моделі мультиагентної системи. У якості параметрів оцінки виступали такі: оцінка роботи з даними та формування бази знань, оцінка організації архітектури та виконання процесів системою, оцінка ефективності навчання агентів, оцінка взаємодії функціональних елементів системи, оцінка взаємодії «людина-машина» й оцінка ефективності використання апаратних і програмних ресурсів інформаційних систем.

Ключові слова: мультиагентна система, інтелектуальний агент, глибинний аналіз даних, нейромережвий алгоритм, кластеризація, інформаційна система, мережвий ресурс.

Постановка проблеми. Відповідно до стандартного визначення агент є програмним алгоритмом, що запускається з метою виконання певного завдання відповідно до запиту користувача чи іншого програмного блоку. Сучасні системи інтелектуального (глибинного) аналізу даних (data mining) зазвичай розглядаються як сукупність агентів і зв'язків між ними. Агент такої системи визначається як функціональний елемент, що здатний до аналізу та впливу на середовище мережевого ресурсу інформаційної системи (далі – ІС), частиною якої він є.

Інтелектуальний аналіз даних є комплексним процесом із визначення закономірностей і моделювання правил організації великих об'ємів даних. Аналіз на базі агента зумовлює застосування системою автономних інтелектуальних агентів із метою підтримки процесу пошуку та прийняття рішень, що має призводити до збільшення рівня продуктивності та масштабованості програмного комплексу. Завдяки параметрам автономності, мобільності й адаптивності використання інтелектуальних агентів вважається ефективним рішенням для паралельного та розподіленого аналізу даних [1].

Функціональні можливості роботи агента як програмного комплексу можна розділити на три групи (рис. 1):

– агент реагування (reactive agent);

– проактивний агент (proactive agent);

– інтерактивний агент (social or interactive).

Режим роботи «агент реагування» обмежується впливом алгоритму на взаємодію типу «машина-машина» (M2M: machine-to-machine) і реагуванням на конкретні запити чи запуском відповідно до заданого режиму. У проактивному режимі агент самостійно аналізує потоки даних, на цьому рівні додається аналіз взаємодії типу «людина – машина» (P2M: person-to-machine). В інтерактивному режимі агент, крім того, здійснює вплив на інших агентів і здатен впливати на взаємодію типу «людина – людина» (P2P: person-to-person). Слід зауважити, що мультиагентна система зазвичай реалізує всі три наведені режими роботи. Упровадження таких систем дозволяє збільшити функціональність з'єднання M2M-типу та зменшити обсяг P2M-контактів, що призводить до вивільнення людського ресурсу, зокрема спеціалістів, що задіяні в рутинних операціях із підтримки стабільної роботи IT-інфраструктури [1].

Із метою визначення ключових аспектів побудови мультиагентних систем було проведено аналіз останніх досліджень і публікацій, присвячених методам глибинного аналізу даних. Так, у роботах [1–3] загальні принципи побудови інтелектуального агента як функціонального вузла системи глибинного аналізу даних. Дослідження [4–9] присвячені особливостям побудови мультиагентних систем і перевагам підходів, моделей і архі-

тектур, що можуть бути використані в процесі їх розроблення. Також у роботах [5; 9–11] були розглянуті та проаналізовані підходи, що останнім часом застосовуються у побудові мережевих сервісів на основі мультиагентних систем розподіленого глибинного аналізу великих об’ємів даних.

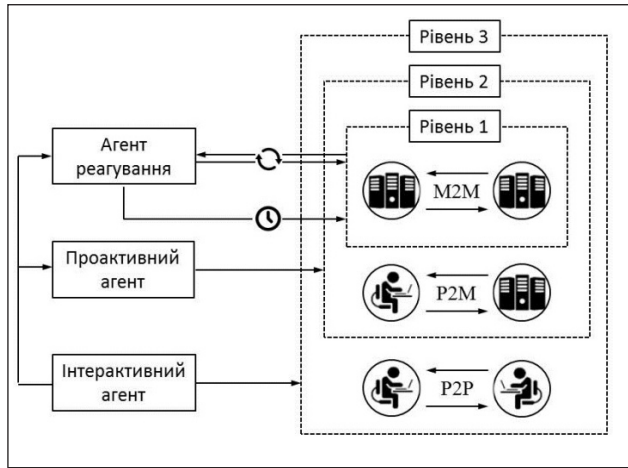


Рис. 1. Базові режими роботи мультиагентної системи

Постановка завдання. Проведений аналіз досліджень мультиагентних систем дає можливість побудувати цілісну методологію, що може слугувати універсальним інструментом розроблення архітектури алгоритмів на основі інтелектуальних агентів відповідно до поставлених задач. Тому метою роботи є аналіз підходів, що використовуються під час створення моделей інтелектуального аналізу великих об’ємів даних у рамках розподілених систем.

1. Використання інтелектуального агента під час аналізу даних

На рис. 2 показано, що глибинний аналіз даних із боку агента є двостороннім процесом. З одного

боку, він включає аналіз даних агентом, що пере-дує етапу прийняття рішень, а з іншого – оброблені дані використовуються для навчання й оптимізації алгоритму самого агента. Він складається з оброблення даних за допомогою агента, а також пошуку даних для агентів [1–3]. Процес аналізу включає таке:

- інтеграцію даних;
- попереднє оброблення даних;
- класифікацію даних;
- кластеризацію даних;
- визначення асоціативних правил;
- представлення даних у формі бази знань.

При цьому представлення даних у формі бази знань використовується для вдосконалення логіки агента.

Оцінка ефективності застосування інтелектуального агента під час глибинного аналізу даних залежить від аспектів роботи системи, що підлягають перевірці. Зазвичай виділяють такі рівні оцінки:

- рівень роботи з даними та формування бази знань;
- рівень організації архітектури та виконання процесів системою;
- рівень ефективності навчання агентів;
- рівень взаємодії функціональних елементів системи;
- рівень P2M-взаємодії;
- рівень ефективності використання апаратних і програмних ресурсів ІС.

Інтеграція інтелектуальних агентів за умови адекватної організації системи суттєво збільшує продуктивність роботи комплексу та спрощує його структуру. Під час вивільнення людського ресурсу робота з такими системами надає широкі можливості для використання її профільними

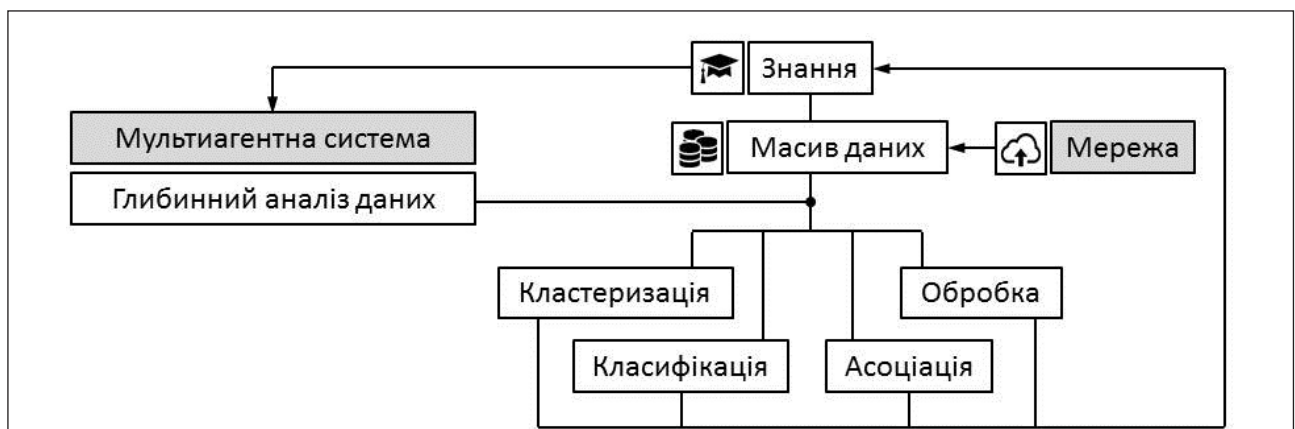


Рис. 2. Схема глибинного аналізу даних мультиагентною системою зі зворотним зв’язком

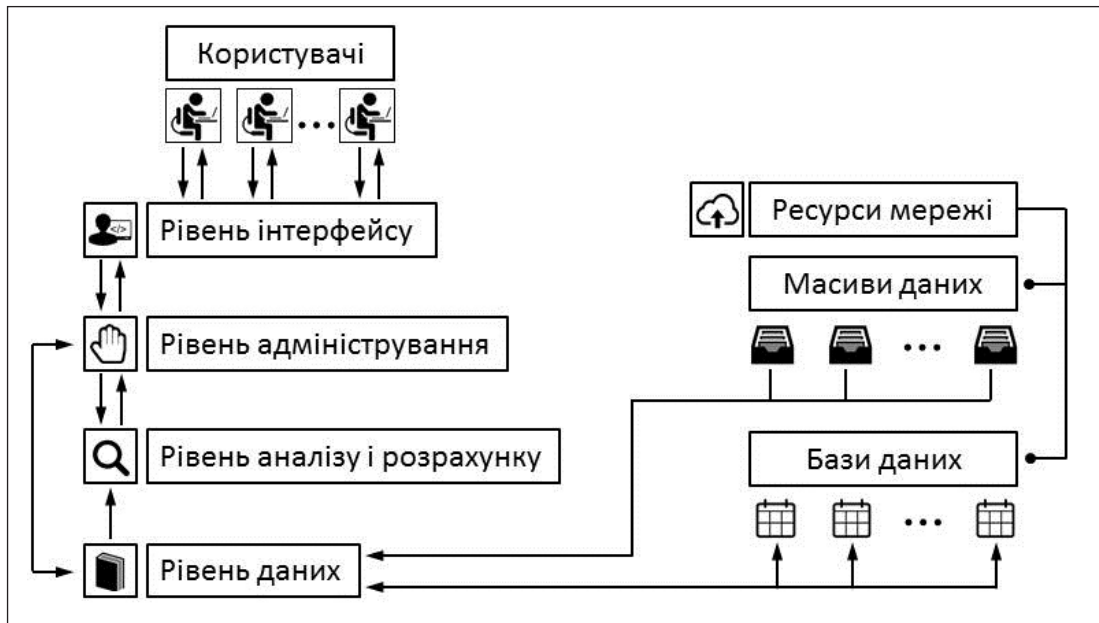


Рис. 3. Чотирирівнева архітектура мультиагентної системи

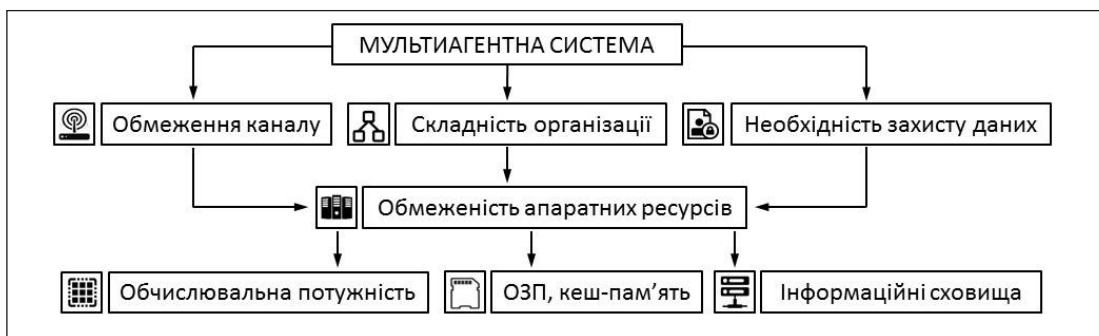


Рис. 4. Особливості організації мультиагентної системи розподіленого аналізу даних

фахівцями та мультидисциплінарними експертами. Така система підвищує якість отриманих знань, спрощує процес ідентифікації моделей, а також сприяє процесу прийняття рішень у режимі реального часу [1].

2. Побудова мультиагентної системи аналізу даних

Як було вказано вище, сучасні системи глибокого аналізу даних містять у собі певну кількість багатофункціональних агентів, а отже, можуть розглядатися як мультиагентні. Базова структура, представлена на рис. 3, складається з чотирьох рівнів:

- 1) рівень інтерфейсу;
- 2) рівень адміністрування;
- 3) рівень аналізу й розрахунку;
- 4) рівень даних.

Завдання, що необхідно виконати, визначається користувачем на рівні інтерфейсу. На цьому

рівні активуються агенти інтерфейсу, що перетворюють запит користувача на інструкції для машинних алгоритмів системи [4–7]. На рівні аналізу й розрахунку за допомогою відповідних агентів відбувається глибокий аналіз даних. При цьому дані отримуються з масивів і баз даних на рівні, що оперується агентами даних. Агенти рівня адміністрування при цьому керують процесом вирішення задач; таким чином, цей рівень слугує зв'язком між іншими рівнями, а також використовується для вибору оптимального методу й отримання статистичних даних роботи системи.

Організація мультиагентного розподіленого глибокого аналізу даних є нетривіальною задачею, що вимагає побудови ефективної інфраструктури мережевого ресурсу ІС і вирішення значної кількості проблем, що пов'язані між собою (рис. 4), серед яких можна виділити такі:

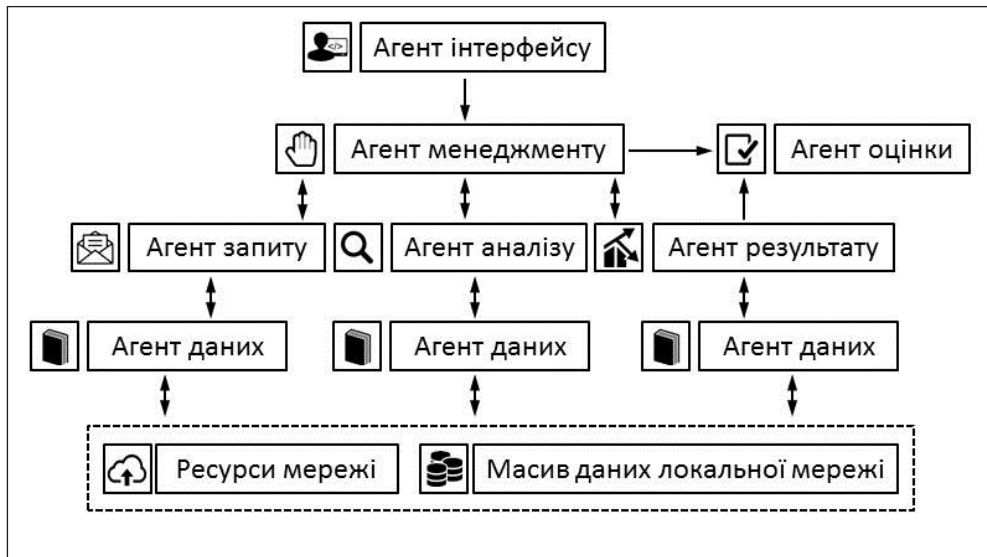


Рис. 5. Архітектура мультиагентної системи розподіленого аналізу даних

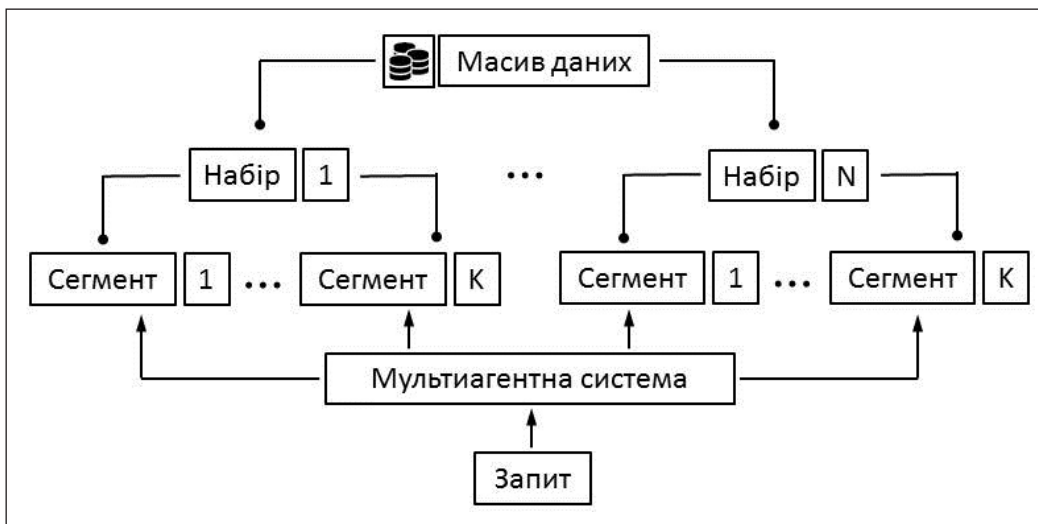


Рис. 6. Алгоритм роботи мультиагентної системи розподіленого аналізу даних

- обмеження на пропускну спроможність каналів передачі даних;
- складність організації багатокомпонентної системи, що складається з автономних агентів;
- загроза нелегального доступу до конфіденційних даних;
- обмеження на потужність обчислювальних ресурсів.

Така система має забезпечувати відповідний рівень масштабованості, інформаційного захисту, надійності функціонування, адаптивності й автономності процесу отримання даних агентами.

Під час розподіленого мультиагентного глибокого аналізу даних (MADM: Multi-Agents Systems In Distributed Data Mining) зазвичай використовуються такі агенти [5–9]:

- агент інтерфейсу, що, як було вказано, відповідає за зв'язок із користувачем;
- агент менеджменту, що отримує запити від агента інтерфейсу, формує план із їх виконання й відповідає за їх завершення, а також синхронізує діяльність інших агентів;
- агент даних, що передає дані з наявних джерел до агентів аналізу, результату та запиту;
- агент аналізу, що реалізує алгоритм глибокого аналізу на основі інформації, наданої модулем знань;
- агент результату, що отримує результат пошуку даних від агента аналізу та представляє ці результати через шаблони звітів;
- агент оцінки, що містить імена та параметри всіх зареєстрованих агентів;

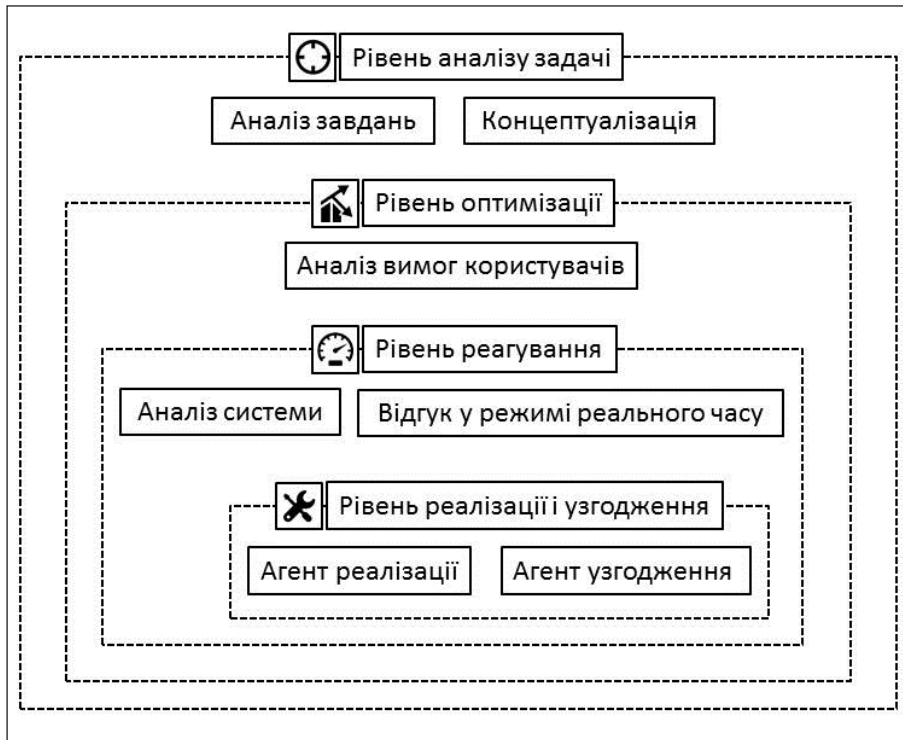


Рис. 7. Багаторівнева схема оптимізації системи глибокого аналізу даних

– агент запиту, що створюється для кожного запиту користувача та використовує правила бази знань для створення запитів належної форми.

Типова архітектура організації мультиагентної системи розподіленого аналізу даних показана на рис. 5.

3. Підтримка й оптимізація мультиагентної системи аналізу даних

Для забезпечення ефективної роботи мультиагентної системи глибокого аналізу даних необхідно провести попередній етап поділу та класифікації великих об’ємів даних, що підлягають аналізу [5; 8–9]. Зазвичай масив даних розділяють на N наборів, кожен із яких поділяється на K сегментів (рис. 6), при цьому

$$K = \frac{N}{q}, \text{де } q \in [1; N]. \quad (1)$$

Із кожним сегментом працює окремий агент, що на основі його аналізу генерує відповідні моделі та правила.

Після цього етап класифікації може бути реалізований шляхом визначення відстані між параметрами об’єктів відповідно до обраної метрики. Так, відстань між параметрами x_i та x_j може бути визначена відповідно до метрики Мінковського

$$D_{ij} = \left[\sum_{i=1}^d |x_i - x_j|^{\frac{1}{n}} \right]^n \text{де } n, d - \text{натуральні числа,} \\ \{\mathbb{N}\} \quad (2)$$

або Манхетенської метрики:

$$D_{ij} = \sum_{i=1}^d |x_i - x_j|. \quad (3)$$

Для оптимізації мультиагентної системи використовуються протоколи взаємодії з користувачами на рівні інтерфейсу. При цьому схема оптимізації системи глибокого аналізу даних складається з таких шарів (рис. 7):

- рівень аналізу задачі;
- рівень оптимізації;
- рівень реагування;
- рівень реалізації й узгодження.

На першому рівні розглядається сама постановка завдання, створюється шаблон рішення і здійснюється концептуалізація конкретних задач. На рівні оптимізації проводиться аналіз запитів і оцінки роботи системи користувачем. На рівні реагування система дає відповідь на виклики відповідно до правил із бази знань. Агенти в цьому шарі не проходять етап навчання, тому що від них вимагається реакція в режимі реального часу. Останній, найбільш глибокий рівень, надає можливість прискорити процес видобування даних за допомогою паралельного чи розподіленого оброблення.

Як показано на рис. 8, оптимізація мультиагентної системи використовує як основу базу переконань. Далі агент оптимізації передає дані до агента прогнозування. На початку організації

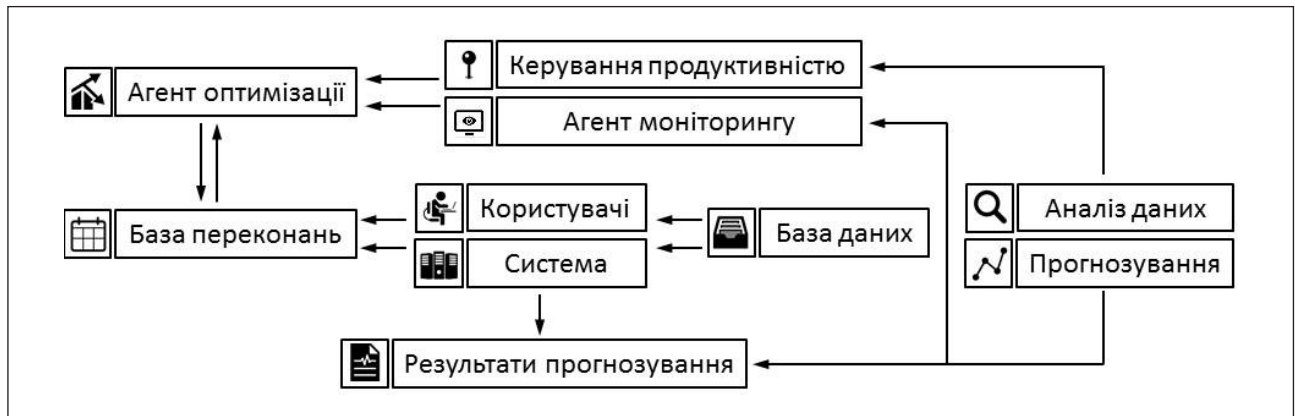


Рис. 8. Оптимізація прогнозування в глибокому аналізі даних

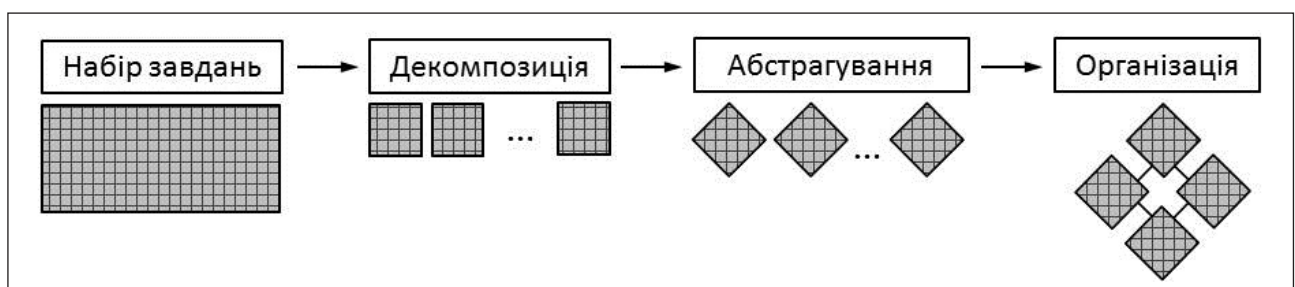


Рис. 9. Алгоритм паралельного глибокого аналізу нечітких наборів даних

роботи системи користувач має забезпечувати зворотний зв'язок, за якого відгуки повідомляються агенту моніторингу. Таким чином, навчання відбувається на основі фактичного зворотного зв'язку, а отже, у ролі агента моніторингу може виступати користувач, що спеціалізується на мультиагентних системах. У будь-якому разі агент моніторингу та керування продуктивності повинен виконувати певні завдання для досягнення мети, зокрема, кількісно оцінювати відгуки інших користувачів. На основі зворотного зв'язку можна побудувати модель, що на базі статистичних даних екстраполює функціональний зв'язок між системними прогнозами та реакцією користувачів. Основним обмеженням на цьому етапі є якість зворотного зв'язку (як на рівні P2P, так і на рівні P2M). Інше обмеження міститься в просторі пошуку, що може не відповідати обмеженим обчислювальним ресурсам. Агент продуктивності може бути функціональним вузлом прийняття рішень, користувачем, який викликається координатором, або координатором (відповідно до виконання задачі оптимізації системи). Для прогнозування зазвичай використовуються нейромережеві моделі (далі – НММ) [12], що навчаються на основі інформації, накопиченої в базі даних системи. Нейромережевий аналіз охоплює як про-

гнозування роботи машинних алгоритмів, так і відгуки користувачів відповідно до вивчення типових патернів людської поведінки.

Через те, що користувач є частиною системи, а оптимізація базується на його відгуках, у мультиагентних системах активно використовуються технології м'яких обчислень (soft computing), зокрема нечітка логіка [7].

4. Організація мультиагентної системи паралельного аналізу нечітких даних

Для аналізу неточних або неповних даних і пошуку взаємозв'язків між ними в мультиагентних системах використовуються грубі набори (rough sets). Для наборів даних цього типу не використовується додаткова інформація, як-то статистика, імовірнісні залежності тощо [1–11]. Мультиагентні системи ефективно працюють із грубими наборами в рамках підходу паралельного аналізу даних. Базовими етапами, що здійснюються під час реалізації цього підходу (рис. 9), є такі:

- декомпозиція;
- абстрагування;
- організація.

Аналогічно до розділення масиву даних, що аналізується, на набори, систему можна розділити на багато підсистем, кожна з яких може бути представлена власним субагентом. При цьому кожен

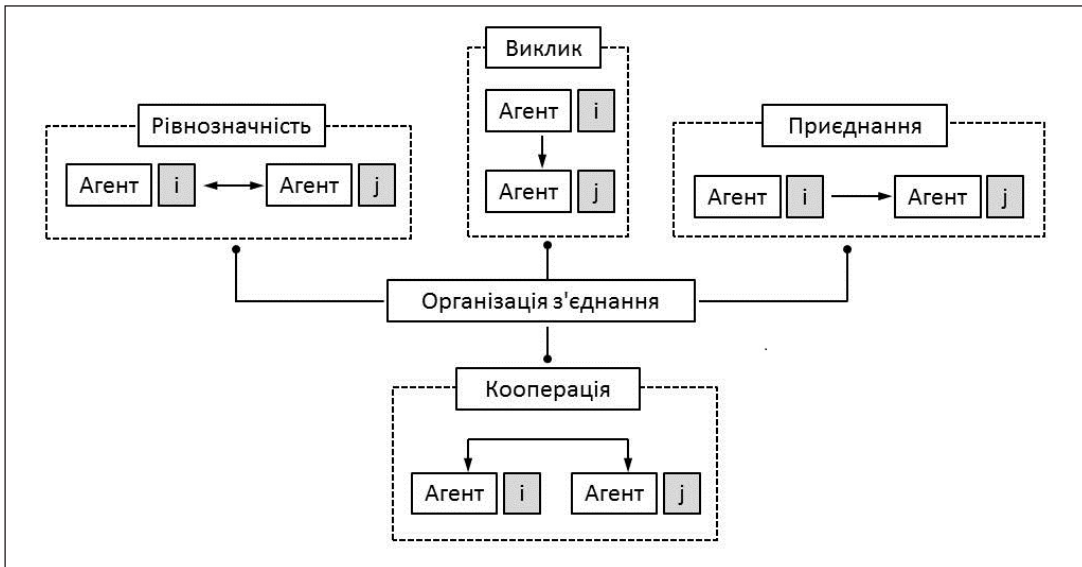


Рис. 10. Основні види взаємозв'язку між агентами



Рис. 11. Загальна схема роботи мультиагентної системи розподіленого глибокого аналізу

субагент включає набір завдань, алгоритм аналізу й інтерфейс зв'язку з іншими субагентами. Згідно із цим підходом, кожна субінформаційна система є інтелектуальним агентом, що використовує власний метод глибокого аналізу даних. Використовуючи різні типи взаємозв'язків між агентами, можна отримати остаточні правила прийняття рішень.

Основними типами взаємозв'язку між агентами є рівнозначність (equivalence), приєднання (inclusion),

кооперація (cooperation), виклик (calling). На основі цих правил можна побудувати мультиагентну систему будь якої складності (рис. 10).

Таким чином, загальна схема роботи мультиагентної системи розподіленого глибокого аналізу базується на взаємодії між функціональними вузлами, що складаються із субагентів, які взаємодіють між собою (рис. 11). Оптимізація системи в режимі реального часу відбувається за

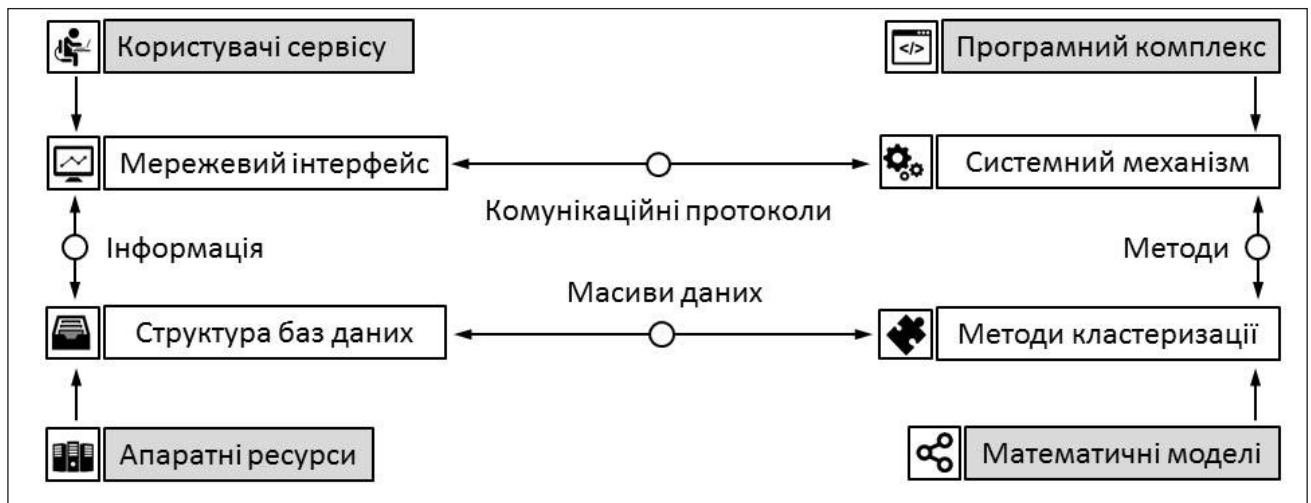


Рис. 12. Веб-сервіс на основі мультиагентної системи

рахунок роботи агента ефективності, який відповідає за взаємодію між іншими агентами й аналіз статистики.

Мультиагентну систему розподіленого аналізу даних можна розглядати як веб-сервіс із доступом і розмежуванням доступу користувачів глобальної мережі (рис. 12).

Висновки. У роботі проведено аналіз мультиагентних систем глибокого аналізу великих об'ємів даних. Показано, що процес аналізу включає сукупність етапів з інтеграції, попереднього оброблення, класифікації, кластеризації даних, а також визначення асоціативних правил і представлення даних у формі бази знань.

Проведене дослідження побудови методологічних основ визначення функціональності моделі мультиагентної системи. Указані основні проблеми організації веб-сервісу з використан-

ням мультиагентної системи глибокого аналізу даних. Основними є обмеження на пропускну спроможність каналів передачі даних, складність організації багатокomпонентної системи, що складається з автономних агентів, загроза нелегального доступу до конфіденційних даних і обмеження на потужність обчислювальних ресурсів.

Зауважено, що на початку організації роботи системи користувач має забезпечувати зворотний зв'язок, виступаючи в ролі агента моніторингу. Агент моніторингу та керування продуктивністю повинен кількісно оцінювати відгуки інших користувачів. Зазначається, що для прогнозування зазвичай використовуються нейромережеві моделі, що навчаються на основі інформації, накопиченої в базі даних системи. Побудовані схеми організації мультиагентної системи паралельного аналізу нечітких даних.

Список літератури:

1. Data Mining. (2017). Larsen & Keller Educ, 3rd ed., Saltham: Neruda.
2. Fariz A., Abouchabaka J., & Rafalia N. Using multi-agents systems in distributed data mining: a survey. *Journal of Theoretical & Applied Information Technology*, 2015. 73(3), Pp. 427–440.
3. Cao L., Weiss G., & Philip S. A brief introduction to agent mining. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 2012. 25(3), Pp. 419–424.
4. Russell S., & Norvig P. *Artificial intelligence: a modern approach*. Malaysia; Pearson Education Limited. 2016.
5. Corchado J. Trends in practical applications of agents and multiagent systems: 9th International Conference on Practical Applications of Agents and Multiagent Systems. Berlin: Springer. 2011.
6. Al-Barky M., Ali J. Intelligent mining agent, in 8th International Conference on Computing Technology and Information Management (ICCM), 2012. 1. P. 23.
7. Serrano E., Rovatsos M., & BotíA J. A. Data mining agent conversations: A qualitative approach to multiagent systems analysis. *Information Sciences*, 230, 2013. Pp. 132–146.
8. Kazík O., Pešková K., Pilát M., & Neruda R. Meta learning in multi-agent systems for data mining. In *Proceedings of the 2011 IEEE/WIC/ACM International Conferences on Web Intelligence and Intelligent Agent Technology-Volume 02*, 2011, August. Pp. 433–434. IEEE Computer Society.

9. Sharma D., & Shadabi F. Multi-agents based data mining for intelligent decision support systems. In Systems and Informatics (ICSAI), 2014, 2nd International Conference on IEEE. (2014, November). Pp. 241–245.
10. Corchado J. Trends in practical applications of agents and multiagent systems. 9th International Conference on Practical Applications of Agents and Multiagent Systems. Berlin: Springer. 2011.
11. Chaimontree S., Atkinson K., & Coenen F. (2011, May). A multi-agent based approach to clustering: harnessing the power of agents. In International Workshop on Agents and Data Mining Interaction. Springer, Berlin, Heidelberg. Pp. 16–29
12. Pandey T., Panda N., & Sahu P. Improving performance of distributed data mining (DDM) with multi-agent system. IJCSI Int. J. Comput. Sci, 2(9), 2012. Pp. 74–82.

ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ МУЛЬТИАГЕНТНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ЗАДАЧ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ

Проведен анализ мультиагентных систем глубинного анализа больших объемов данных, которые были рассмотрены как совокупность интеллектуальных агентов и связей между ними. Показано, что процесс анализа включает совокупность этапов по интеграции данных, предварительной обработке данных, классификации данных, кластеризации данных, определению ассоциативных правил и представлению данных в форме базы знаний. В работе проведено исследование по построению методологических основ определения функциональности модели мультиагентной системы. В качестве параметров оценки выступали оценка работы с данными и формирование базы знаний, оценка организации архитектуры и выполнения процессов системой, оценка эффективности обучения агентов, оценка взаимодействия функциональных элементов, оценка взаимодействия «человек – машина» и оценка эффективности использования аппаратных и программных ресурсов информационных систем.

Ключевые слова: мультиагентная система, интеллектуальный агент, глубокий анализ данных, нейросетевой алгоритм, кластеризация, информационная система, сетевой ресурс.

AN OVERVIEW OF EXISTING MULTI-AGENT SYSTEMS FOR DATA MINING PROBLEM SOLVING

The paper analyzes the multi-agent systems for data mining of large amounts of data, which are considered as a set of intellectual agents and relationships between them. It is shown that the process of data analysis includes the stage of data integration, pre-processing, classification, clustering, the definition of associative rules and the presentation of data in the form of a knowledge base. As evaluation parameters are used such parameters as: evaluation of work with data and the knowledge base creation, evaluation of system architecture organization and system processes execution, agents learning efficiency, evaluation of functional elements interaction, evaluation of “man – machine” interaction, efficiency of hardware and software resources usage. The example of a web-service indicates the problems that arise during a multi-agent system for data mining development process.

Key words: multiagent system, intelligent agent, data mining, neural network algorithm, clusterization, information system, network resource.

ЕНЕРГЕТИКА

УДК 621.039.743

Азаров С.І.

Інститут ядерних досліджень НАН України

Сидоренко В.Л.

Інститут державного управління у сфері цивільного захисту

Задунай О.С.

Державний науково-дослідний інститут спеціального зв'язку та захисту інформації

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ТЕПЛОМАСООБМІНУ В СХОВИЩІ ВІДПРАЦЬОВАНОГО ЯДЕРНОГО ПАЛИВА

Виконано розрахунковий аналіз поведінки палива в басейні витримки під час аварії, що супроводжуються втратою можливості забезпечення тепловідведення або підтримання запасу теплоносія. У статті представлена математична модель і результати розрахунків із визначення локальних значень температур у сховищі відпрацьованого ядерного палива в різні моменти часу як у штатній, так і в аварійній ситуації через припинення циркуляції води через басейн витримки.

Ключові слова: атомна електростанція, відпрацьоване ядерне паливо, сховище «мокрого» типу, басейн витримки, чисельне моделювання.

Постановка проблеми. Аварії на сховищах відпрацьованого ядерного палива (далі – СВЯП), розташованих на території атомних станцій, є малоймовірними, але можливими подіями. Про це свідчить світовий досвід, зокрема: короткочасна (близько доби) втрата охолодження басейнів із відпрацьованим ядерним паливом (далі – ВЯП) на підприємстві з переробки палива в Селлафілді (Велика Британія) [1, с. 298], а також недавня тривала втрата охолодження приреакторних басейнів на енергоблоках АЕС «Фукусіма-1» [2]. Як відомо, її наслідки були вкрай важкими: повна втрата (випарювання) води з басейну, перегрів цирконієвих оболонок тепловиділяючих елементів, пароцирконієва реакція з виділенням водню, утворенням гримучої суміші, вибухом і забрудненням довкілля продуктами аварії.

Нині більша частина ВЯП атомних електростанцій (далі – АЕС) перебуває в умовах т. зв. «мокрого» зберігання у СВЯП. Це басейни, через які прокачується вода, що нагрівається теплотою залишкового енерговиділення ВЯП, яка охолоджується потім у теплообмінниках зовнішньої системи охолодження. СВЯП «мокрого» типу роз-

ташовуються на території АЕС та призначені для подальшої хімічної переробки ВЯП або для його «остаточного» захоронення. Одночасно в одному СВЯП може зберігатися до декількох десятків тисяч відпрацьованих тепловиділяючих збірок (далі – ТВЗ).

Так, наприклад, за період експлуатації блоків Чорнобильської АЕС у генеруючому режимі на майданчику накопичено понад 21 000 відпрацьованих паливних збірок. Це паливо знаходилося на зберіганні в приреакторних басейнах витримки (далі – БВ) 1, 2 і 3 блоків із розміщенням за проектною схемою, а також у чотирьох відсіках СВЯП-1. 5 відсік СВЯП-1 до певного моменту вважався резервним.

Станом на кінець 2005 р. загальна кількість відпрацьованих тепловиділяючих збірок на Чорнобильській АЕС становила 21 284 одиниці, 68 невідпрацьованих тепловиділяючих збірок (далі – ТВЗ) та 3 неопромінених тепловиділяючих елементи із загальною масою уранової суміші 2 393,071 тонн. У будівлі сховища свіжого палива знаходилося 68 невідпрацьованих ТВЗ та 3 неопромінених тепловиділяючих елементи. В активних

зонах реакторів 1 та 3 енергоблоків знаходилося 2 375 ВТВЗ, у БВ блоків 1, 2, 3 – 3 306,5 ВТВЗ. Взагалі на енергоблоках знаходилося 5 681,5 ВТВЗ. У БВ СВЯП зберігалось 15 603 ВТВЗ.

Станом на кінець 2010 р. в БВ блоків № 1–2 ДСП ЧАЕС зберігалось 2 720 ВТВЗ. Із них 1 365 ВТВЗ – у БВ блоку № 1, 1 355 ВТВЗ – у БВ блоку № 2.

Станом на 01 січня 2015 р. на майданчику Чорнобильської АЕС зберігалось 21 284 ТВЗ. Із них:

- у БВ СВЯП-1 – 21 231,5 відпрацьованих ТВЗ;
- у БВ енергоблоку № 1 – 32 пошкоджені ТВЗ;
- у БВ енергоблоку № 2 – 20 пошкоджених ТВЗ.

Потужність тепловиділення однієї ВТВЗ відносно невелика, наприклад, для СВЯП ЧАЕС – від 30 до 80 Вт залежно від проміжку часу, що пройшов після вивантаження з реактора. Однак за наявності великої кількості ВТВЗ загальна потужність тепловиділення в сховищі виявляється достатньою, щоб у разі припинення примусової циркуляції води через відсіки басейну температура води через кілька діб досягла високих значень, за яких інтенсивність випаровування стає неприпустимо великою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Над проблемою дослідження безпеки СВЯП, розташованих на території АЕС, працюють багато вітчизняних і закордонних спеціалістів. Різні аспекти й окремі підходи до дослідження цієї проблеми висвітлено у численних працях [1–3], але через те, що цей процес є безперервним, постійним і надзвичайно актуальним, дослідження тривають.

Постановка завдання. Завдання цієї роботи полягає у виконанні розрахункових аналізів пове-

дінки палива у БВ під час аварій, що супроводжуються втратою можливостей забезпечення тепловідведення або підтримання запасу теплоносія.

Мета статті – навести результати розрахункових аналізів сценаріїв важких аварій, пов'язаних із втратою тепловідведення від БВ АЕС.

Виклад основного матеріалу дослідження. У стаціонарному режимі експлуатації СВЯП процеси тепломасообміну збалансовані таким чином, що температури всіх елементів СВЯП практично постійні, тобто схильні тільки до сезонних коливань. В аварійній ситуації (припинення циркуляції охолоджуючої води, а також припинення примусової повітряної вентиляції надводного простору) цей баланс порушується в бік перевищення тепловиділення над тепловідводом, і це положення зберігається доти, поки знов не встановиться рівновага, але вже на більш високому температурному рівні. Підвищення температури води в пеналах і БВ супроводжується збільшенням темпу випаровування води, що веде до зниження рівня води в пеналах та басейні і, як наслідок, до повного або часткового осушення ВТВЗ.

Ці обставини роблять актуальною розробку сценаріїв виникнення і розвитку гіпотетичних аварій, які можуть статися через тривале знеструмлення СВЯП і припинення циркуляції води через басейн зберігання ВЯП. Найбільш повна інформація в цій області може бути отримана за допомогою методів математичного моделювання.

Розрахункова модель СВЯП є приведенням до однієї ВТВЗ «мікросховище» ВЯП, що містить всі елементи натурального сховища ВЯП, що беруть участь у тепломасообмінних процесах: теплови-

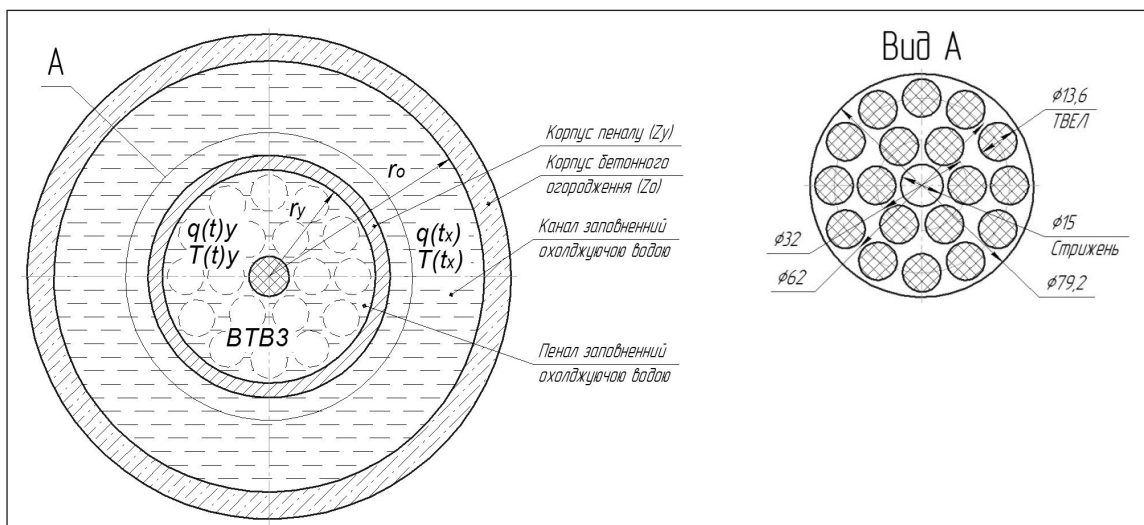


Рис. 1. Конфігурація розташування елементів і теплових зв'язків між ними в модельній «комірці» СВЯП

діляючі елементи, пенали, вода пеналів і басейн, торцеве і бічне огороження басейну та ін. (рис. 1).

У моделі всі вертикальні розміри, розміри пенала і його вмісту збережені натурними, а міжпенальний простір змодельований більш простим для розгляду, але подібним відносно до конвективної тепловіддачі кільцевим каналом. Причому радіальні розміри моделі вибрані таким чином, щоб у розрахунку на одну ВТВЗ у моделі і в натурному СВЯП були рівні такі площі:

а) поперечного перерізу міжпенального простору;

б) поперечного перерізу бокових бетонних огорож;

в) поверхні випаровування всередині пенала.

Таким чином, у розрахунку на одну ВТВЗ у моделі і в натурному сховищі дотримано рівність обсягів, мас і теплоємність розглянутих елементів СВЯП. Умови теплопередачі через зовнішні огороження басейну визначені з використанням критерію крайової подібності Біо, що є відношенням внутрішнього і зовнішнього термічних опорів.

У деякий момент часу t в СВЯП відбувається теплообмін між його елементами та навколишнім середовищем [4, с. 67–76].

На основі теплового балансу між кінцевими елементами і середовищем складаємо систему диференціальних рівнянь збереження для модельної «комірочки» СВЯП, яка має вигляд:

$$\int_{V_j} q(\vec{r}, t) d\vec{V}_j = \int_{V_j} c(\vec{r}) \frac{\partial \theta(\vec{r}, t)}{\partial t} d\vec{V}_j - \int_{V_j} \text{div} \vec{q}(\vec{r}, t) d\vec{V}_j, \quad (1)$$

де $j=1, 2, \dots, K$;

$q(\vec{r}, t)$ – потужність внутрішніх джерел тепла j -го тіла в $T(r)$ момент часу t ;

$c(\vec{r})$ – ізохорична теплоємність j -го тіла в $T(r)$ момент часу t ;

V – об'єм j -го тіла.

Застосовуючи формулу Остроградського-Гауса, перетворюємо другі члени системи рівнянь (1) за допомогою оператора усереднювання

$$L[f(\vec{x}, t)] = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} f_i(\vec{x}, t) dA \equiv \tilde{f}(x, t), \quad (2)$$

Усереднимо всі члени системи (2). Отримаємо систему диференціальних рівнянь із розподільними параметрами вигляду:

$$\tilde{q}(t)_j = \tilde{C}_j \frac{\partial \tilde{\theta}^V(t)_j}{\partial t} - \tilde{\lambda}_j \left[\frac{d\tilde{\theta}^S(t)_j}{dr_j} \right]_{S_j}, \quad (3)$$

де $\tilde{\theta}^V(t)$ – відносна середньооб'ємна температура j -го тіла у момент часу t ;

$\tilde{\theta}^S(t)$ – відносна середньооб'ємна температура j -го тіла у момент часу t ;

$\tilde{\lambda}$ – усереднений коефіцієнт теплопровідності j -го тіла.

Припустимо, що твели зв'язані між собою ідеальними тепловими зв'язками, і їх можна розглядати як єдине суцільне тіло. Позначимо пенал із твелами внутрішнього та зовнішнього рядів як y , а корпус бетонного огороження – як o . У якості граничних умов були прийняті умови третього роду.

З урахуванням цих припущень і позначень замінимо систему диференціальних рівнянь із розподіленими параметрами системою рівнянь із зосередженими параметрами.

На основі теплового балансу складаємо систему рівнянь (4):

$$\begin{cases} q(t)_y = \frac{C_y \cdot dT(t)_y}{dt - \lambda_y \cdot \left[\frac{dT(t)_y}{dr_y} \right]_{S_y}} \\ q(t)_o = \frac{C_o \cdot dT(t)_o}{dt - \lambda_o \cdot \left[\frac{dT(t)_o}{dr_o} \right]_{S_o}} \end{cases} \quad (4)$$

За граничні умови задаємо:

- у центрі сердечника потік дорівнює нулю;
- на межах шарів умови зшивання;
- на зовнішній межі в модельній «комірці» СВЯП умови третього роду.

Тоді з урахуванням цього система (4) матиме вигляд:

$$\begin{cases} \frac{d^2 T(t)_y}{dr^2} + A_1 \cdot \left(\frac{dT(t)_y}{dt} \right) + A_2 \cdot T(t)_y = A_3 \cdot q(t)_y + A_4 \cdot T(t), \\ T(t)_o = A_5 \cdot \frac{T(t)_y}{dt} + A_6 \cdot T(t)_y - A_7 \cdot q(t); \end{cases} \quad (5)$$

де $q(t)$ – питомий тепловий потік у перетині модельної «комірочки» СВЯП;

C – теплоємність у перетині модельної «комірочки» СВЯП;

λ – теплопровідність у перетині модельної «комірочки» СВЯП;

T_0^{np} – максимально припустима температура оболонки;

A – постійні коефіцієнти;

C – константи інтеграції;

O – оболонка (корпус бетонного огороження).

Рішення рівняння (5) знайдемо за допомогою квадратур із рішення однорідного рівняння за таких значень z_y і z_o :

$$z_y > z_o \quad T(t)_0 = C_1 \cdot \exp(-N_{1,2} \cdot t) + C_2 \cdot \exp(-N_{1,2} \cdot t) \quad (6)$$

$$z_y = z_o \quad T(t)_0 = (C_3 + C_4 \cdot t) \cdot \exp(-N_{1,2} \cdot t) \quad (7)$$

$$z_y < z_o \quad T(t)_0 = \exp\left(-\frac{A_1}{2t}\right) \cdot (C_5 \cdot \cos \beta t + C_6 \cdot \sin \beta t) \quad (8)$$

де $N_{1,2}$ – корені характеристичного рівняння – визначається як:

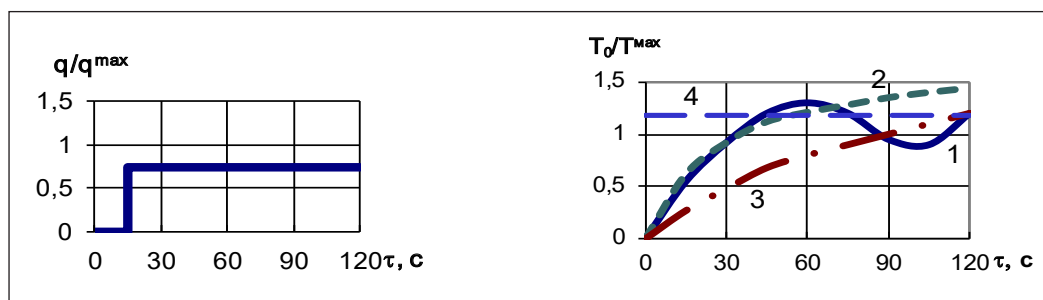


Рис. 2. Теплотехнічна надійність СВЯП за ступінчастого впливу
 1 – $Z_y < Z_0$; 2 – $Z_y > Z_0$; 3 – $Z_y = Z_0$; 4 – T_0/T_{np}

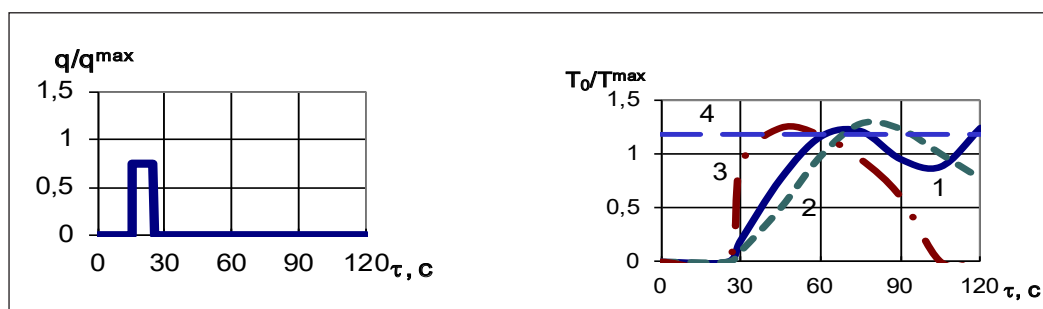


Рис. 3. Теплотехнічна надійність СВЯП за імпульсного впливу
 1 – $Z_y < Z_0$; 2 – $Z_y > Z_0$; 3 – $Z_y = Z_0$; 4 – T_0/T_{np}

$$N_{1,2} = \frac{A_1}{2} \pm \left[\left(\frac{A_1}{2} \right)^2 - A_2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

Із рівнянь (6) і (8) витікає, що, залежно від правильності вибору співвідношення між z_y і z_0 , тобто правильності конструювання СВЯП, можливі різні теплові перехідні процеси в модельній «комірці» СВЯП.

Основним параметром, що визначає працездатність СВЯП під час аварії, буде максимально припустима температура оболонки T_0^{np} , причому теплотехнічна надійність СВЯП забезпечується у разі виконанні умови:

$$f(t) = [T_0^{np} - T(t)_0^{\max}] > 0 \quad (10)$$

Оскільки температура $T(t)_0$ є випадковою величиною, розкид якої близько T_0^{np} характеризується дисперсією $\sigma^2 T(t)$, а закон зміни залежності $f(t)$ є нормальним унаслідок нормальності величини T_0^{np} , то вірогідність події $f(t) > 0$ знайдемо з виразу:

$$f(t) = 0.5 + \Phi \left[\frac{T_0^{np} - T(t)_0}{\sigma \sqrt{T(t)}} \right] > 0 \quad (11),$$

де Φ – функція Лапласа:

$$\Phi(U) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int_0^U \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt, \quad (12)$$

Шляхом моделювання аварійного процесу в модельній «комірці» СВЯП були одержані такі результати.

На рис. 2 і 3 представлені розраховані зміни температури теплоносія в процесі ступінчастої й імпульсної зміни теплового потоку в модельній «комірці» СВЯП за різних значень z_y і z_0 .

З рис. 2 і 3 видно, що в перехідних режимах температура теплоносія може перевищувати, за певних умов, максимально граничну температуру T_0^{np} .

Висновки. Запропонована модель дає можливість із заданим значенням $T(t)_0$ розрахувати теплотехнічну надійність СВЯП для різного впливу навантажень, наприклад, у разі зміни температури теплоносія або енерговиділення в паливі. Такий підхід можливо використовувати для всіх діючих АЕС та СВЯП в Україні.

Список літератури:

1. Bolter H. Inside Sellafield. London: QuartetBooks, 1996. 298 p.
2. Катастрофа на АЭС «Фукусима». URL: <http://nuclphys.sinp.msu.ru/ecology/fukushima/index.html>.

3. Коцуба О.Л., Воробйов Ю.Ю., Жабін О.І., Гуменюк Д.В. Аналіз важких аварій в басейні витримки відпрацьованого ядерного палива АЕС «Фукусіма-Даїчі». Ядерна та радіаційна безпека. 2016. № 4 (72). С. 13–20.
4. Азаров С.И., Скицько Г.А., Сорокин Г.А. Модуль расчета температуры в корпусе ядерного реактора при различных изменениях тепловыделения в активной зоне. Промышленная теплотехника. 2008. Т. 30. № 1. С. 67–76.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛОМАСООБМЕНА В ХРАНИЛИЩЕ ОТРАБОТАННОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА

Выполнен расчетный анализ поведения топлива в бассейне выдержки во время аварий, сопровождающихся потерей возможности обеспечения теплоотвода или поддержания запаса теплоносителя. В статье представлена математическая модель и результаты расчетов по определению локальных значений температур в хранилище отработанного ядерного топлива в различные моменты времени как в штатной, так и в аварийной ситуации из-за прекращения циркуляции воды через бассейн выдержки.

Ключевые слова: атомная электростанция, отработанное ядерное топливо, хранилище «мокрого» типа, бассейн выдержки, численное моделирование.

SIMULATION OF THE HEAT MASSTRANSFER PROCESSES AT A STORAGE FOR SPENT NUCLEAR FUEL

The calculated analysis of the fuel behavior in the soaking basin during the accidents, accompanied by a loss of the ability to provide a heat sink or maintain a coolant stock, is performed. In the paper are presented the mathematical model and the results of calculations of local temperatures in “wet” type storage for spent nuclear fuel. There are considered normal and accident non-stationary situations, connected with the stopping of water circulation through pool.

Key words: nuclear power plant, spent nuclear fuel, “wet” type storage, soaking basin, numerical simulation.

УДК 620.91:004.9

Алтухова Т.В.

ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет»

Скрипник С.А.

ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет»

СОЗДАНИЕ ИННОВАЦИОННОЙ МОДЕЛИ СОЛНЕЧНО-ВЕТРОВОГО ВОЗДУШНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

В статье проанализированы инновационные разновидности альтернативных систем электроснабжения. Предложена новая модель генерирующего технолого-энергетического солнечно-ветрового воздушного комплекса. Показаны приблизительные расчёты мощностей, выдаваемых установкой. Сконструировано твердотельную 3D-модель солнечно-ветрового воздушного комплекса в программе Solid Works Edition 2013. Произведены исследования в пакете программ Flow Simulation и показаны наиболее уязвимые точки аэростата.

Ключевые слова: офшорная энергетика, солнечно-ветровой воздушный комплекс, аэростат, турбинный ветрогенератор, Solid Works Edition 2013, Flow Simulation.

Постановка проблемы. С развитием энергетических технологий учёные всё больше задумываются о том, как генерировать, сохранять и правильно преобразовать энергоресурсы, которые находятся в недрах земли: уголь, газ, нефть, а также возобновляемые источники: солнце, воду, ветер. На данный момент наиболее ярким примером неисчерпаемой энергии является солнечная и ветровая энергия.

Солнечная энергия является одним из наиболее популярных источников энергии, хотя она имеет недостатки из-за низкой солнечной активности в ночное время и облачную погоду, а также занимает большую полезную площадь. Следующая по энергоэффективности – ветровая энергия – также имеет ряд недостатков: техническое обслуживание, потребность в дистанции между ветряками и скорости ветра, достаточной для номинальной работы.

Анализ последних исследований и публикаций. При анализе данного вопроса о применении возобновляемых источников энергии на воздушных аэростатах было выявлено, что такие комплексы не имеют отношения к генерации энергии, но имеют направление автоматизации и автономности таких агрегатов [1–5].

Постановка задания. Главной целью статьи является усовершенствование и преобразование существующих агрегатов в технолого-энергети-

ческий комплекс, который будет обеспечивать электрической энергией разного рода потребителей, а также обеспечивать надёжность работы без вредных выбросов в атмосферу.

Изложение основного материала исследования. Промышленная энергетика, которая использует генерирующие альтернативные источники – капиталоемкая отрасль. Сегодня инженеры-конструкторы, чтобы «поймать» потоки ветра, пытаются забраться на значительные высоты и, чтобы «уловить» солнечные лучи, увеличивают площади, а это, в свою очередь, – весьма сложная и ресурсно-затратная задача. В офшорной энергетике фундамент и монтаж технологически обоснованных проектов поглощает около 30–40% капитальных расходов, к которым стоит также добавить аренду больших площадей, на которых размещаются энергогенерирующие установки. Поэтому ученые все чаще совершают многочисленные попытки снижения капитальных затрат стоимости электроэнергии, производимой на основе солнечной и ветровой энергии [1–3].

Существует несколько направлений данной энергетике – ветровая и солнечная. В настоящее время одним из главных и перспективных направлений развития ветровой энергетике являются плавающие фундаменты. Они работают по принципу «поплавка», прикреплённого ко дну стальными тросами. Прототипов плавающих ветряков в

настоящее время существует только три, каждая из них имеет свои достоинства и недостатки (рис. 1). Главной проблемой данной системы энергоснабжения будет ее зависимость от георасположения, так как моря и океаны, где предполагается установка такого оборудования, слишком непредсказуемы. Уверенность в том, что тросы смогут выдержать такие нагрузки при штормовых условиях и при больших порывах ветра, не повредив составные части, очень мала [1].



Рис. 1. Прототипы ветровых плавающих установок (по источнику [1])

Следующим, и не менее перспективным направлением в ветроэнергетике, является воздушная (Airborne Wind Energy, сокращённо – AWE). В случае AWE запускается в воздух на высоту от 200 до 1 000 м в виде летающих ветряных электростанций. Данные летательные аппараты оснащены ветряными турбинами и приводят в действие наземные генераторы с помощью своих «поводков» (рис. 2).

Главное преимущество летающих ветрогенераторов – отсутствие необходимости в фундаментах. Также они не требуют значительных транс-

портных издержек и работают на значительных высотах в несколько сотен метров, где ветер стабильнее и сильнее [1].

Также проанализируем виды солнечной энергетики [2–4]. В настоящее время строятся солнечные батареи двух типов: башенного и распределённого (рис. 3). Для большого генерирующего эффекта таких видов солнечных установок требуются огромные площади земли, а также дорогостоящий монтаж. Таким образом, эти параметры являются недостатком данного вида источников энергии.

Самыми приемлемыми на сегодня являются дирижабли или аэростат, но их по большей части применяют для наблюдения, связи и передачи данных над территорией, которую они охватывают. Большинство из них считаются автономными и могут находиться в воздухе до 6 месяцев. Аэростаты оснащены солнечными батареями, которые находятся на верхней части, тем самым увеличивая время нахождения агрегата в воздухе с помощью подогрева в них гелия. Таким образом, с применением гелия такие установки можно считать экологически безопасными для окружающей среды [4; 5].

Учитывая все недостатки и преимущества данных видов альтернативных источников энергии, можно сделать солнечно-ветровой воздушный комплекс (далее – СВВК), соединив солнечную и ветровую энергии таким образом, чтобы получить оптимальный объемный летающий объект в виде шара или дирижабля с наибольшей площадью для солнечных панелей при минимальном объеме газообразного наполнителя. А это, в свою очередь, позволит поднять несколько турбинных ветрогенераторов с помощью силы тяги гелия.

По предварительным расчётам, такой аэростат имеет размеры в длину 120 м, в ширину – 30 м, без учёта аэродинамических крыльев и хвостовой части.

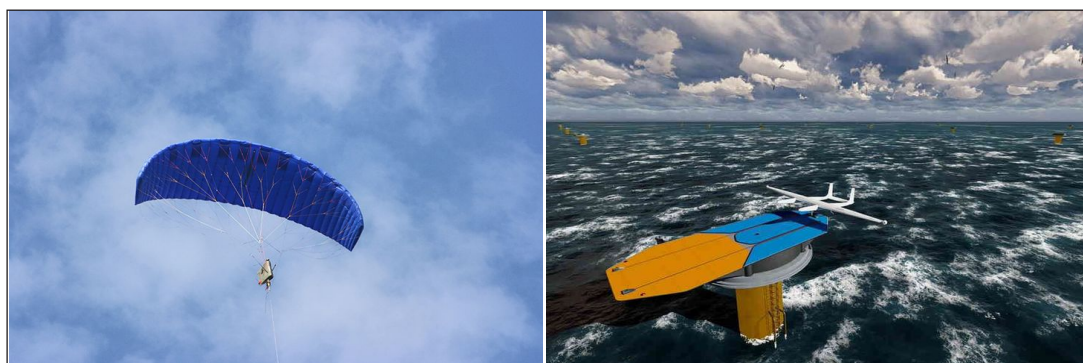
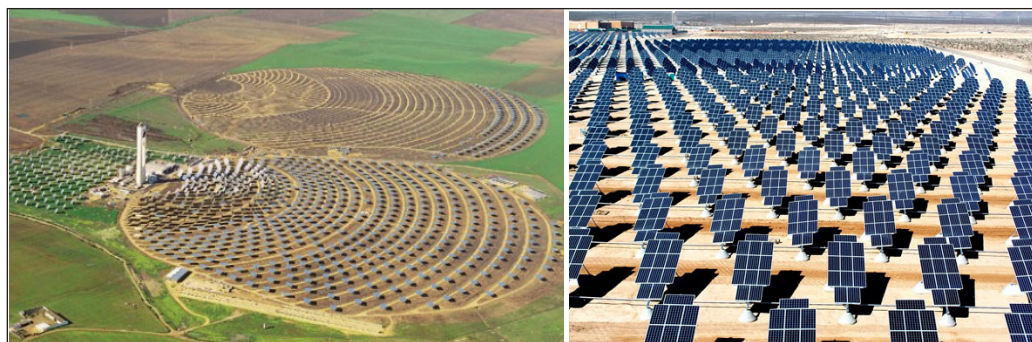


Рис. 2. Виды летающих ветрогенерирующих установок (по источнику [1]): а –воздушный змей; б – летательный аппарат на «поводке»



а) б)
Рис. 3. Солнечные электростанции (по источникам [2; 3]):
 а – башенного типа; б – панельного (модульного) типа

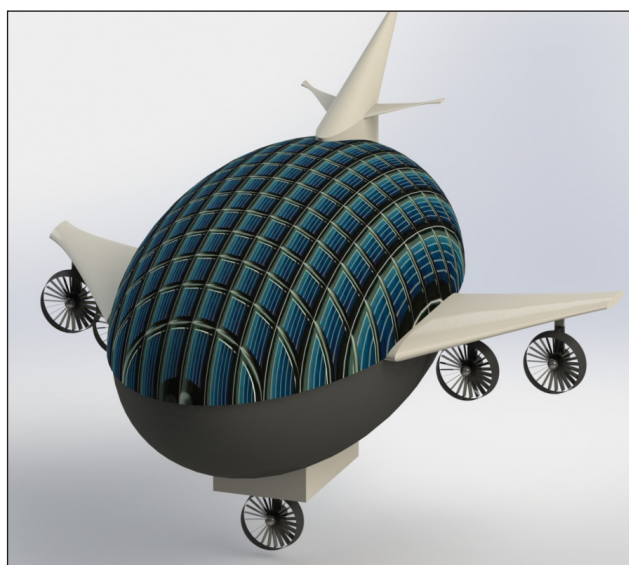


Рис. 4. Инновационная установка СВВК

Таким образом, чтобы получить примерную выдаваемую мощность для солнечных батарей, которые находятся на поверхности дирижабля, необходимо найти площадь, занимаемую солнечными панелями, упрощенный расчет которого описывается ниже:

$$S = \pi \cdot R \cdot h = 3,14 \cdot 30 \cdot 120 = 11304 \text{ м}^2 \quad (1),$$

где R – радиус аэростата;
 h – длина аэростата.

Получаемая мощность солнечных панелей при максимальном поглощении солнечной энергии тогда будет равна:

$$P_s = S \cdot k = 11304 \cdot 0,85 = 9608,4 \text{ кВт} \quad (2),$$

где $k = 0,85$ – коэффициент, который учитывает работу 1 м^2 солнечной панели с учётом потерь на преобразование солнечного света.

Полная мощность СВВК будет равна:

$$P_f = P_s + P_w = 9608,4 + 10 = 9618,4 \text{ кВт} \quad (3),$$

где P_w – мощность установленных ветрогенераторов.

Выдаваемая мощность в сутки с учётом солнечных и ветровых часов:

$$P_f = P_s \cdot t_s + P_w \cdot t_w = 9608,4 \cdot 7 + 10 \cdot 20 = 67458,8 \text{ кВтч} \quad (4),$$

где t_s – среднегодовой период времени, при котором солнечные панели работают при номинальной мощности;

t_w – среднегодовой период времени, при котором турбинные ветрогенераторы работают при номинальной мощности.

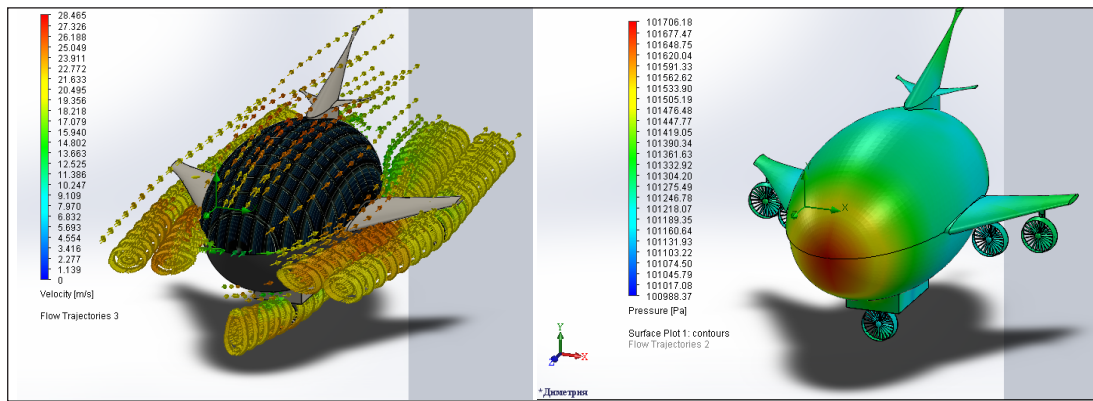
Потребность объёма гелия для подъёма установки:

$$V_c = \pi \cdot R^2 \cdot h = 3,14 \cdot 30^2 \cdot 120 = 339120 \text{ м}^3 \quad (5)$$

Из расчётов понятно, что данный комплекс в полной мере сможет обеспечить небольшую ферму электрической энергией. Также есть возможность добавить несколько ветрогенераторов, которые обеспечивают заряд АКБ при заходе солнца.

Возможность увеличения мощности всего технолого-энергетического комплекса СВВК сводится к увеличению его масштабов, то есть рабочей поверхности и количества установленных на нём ветрогенераторов.

Принцип работы этого комплекса заключается в подъёме на высоту более 200 м конструкции, привязанной тросом к барабану, который контролирует высоту подъёма и передает электрическую энергию в аккумулирующие батареи [6, с. 119]. Объект также имеет аэродинамический механизм полета в воздухе, чтобы получить увеличенный поток ветра. Такой комплекс не занимает площадь земли, которую возможно применять в других целях. СВВК также будет автоматизирован, чтоб при больших порывах ветра или грозе опускаться на безопасную высоту. Диспетчер или оператор может следить за скоростью ветра при помощи



а)

б)

Рис. 5. Полученные параметры в ходе исследование в пакете программ Solid Works Edition 2013 – Flow Simulation: а – анализ потока скорости ветра на работу ветрогенератора; б – анализ давления потока ветра на поверхность аэростата

датчика, который будет располагаться в ветрогенераторе. Разведка метеорологических данных позволит заранее устанавливать комплекс в здании, чтобы не повредить его. К недостаткам данного комплекса можно отнести: большие капиталовложения, требуемую площадку для запуска и посадки установки, использование наполнителей для аэростата (гелий, водород).

Далее показана принципиальная модель СВБК в программе Solid Works Edition 2013 (рис. 4) и более подробно проанализирована его конструкция в пакете программы Flow Simulation. Такой вид анализа позволил найти турбулентные точки и нагрузки, которые испытывает данная установка.

При моделировании такого солнечно-ветрового комплекса необходимо производить сборку отдельных элементов, чтобы каждый механизм был сборочной частью. В свою очередь, это поможет улучшить качество всей целостной модели, так как каждое устройство будет достаточно четко сконструировано и тщательно осмотрено.

В процессе моделирования мы сталкивались с проблемой крепления солнечных панелей на поверхности аэростата, так как в реальности они будут крепиться с помощью тросов или монопити, чтобы выдержать большие потоки ветра. Также предусмотрен отсек в нижней части, в которой будет находиться вся электроника, относящаяся к СВБК.

После того, как твердотельную модель будет сконструировано и собрано в технологический комплекс, необходимо перейти к дальнейшему анализу. Так как эта модель будет парить в воздухе, ее нужно проверить на устойчивость от потока ветров. Данную проверку проводим в пакете программ Solid Works Edition – Flow Simulation,

где устанавливаются параметры потока воздуха и производится расчет аэродинамики объекта исследования. Далее исследуется наличие изменений в расположении элементов или геометрических параметров установки. Такой компьютерный эксперимент позволяет улучшить аэродинамические показатели данного комплекса для последующей реализации данного проекта [7, с. 5].

При анализе данного объекта исследования можно заметить, что турбинные ветрогенераторы, а также сама конструкция аэростата повышают поток ветра от входного значения 20 до 28 м/с (рис. 5, а). Также проанализировано давление на поверхность дирижабля (рис. 5, б), где можно увидеть, что передняя часть существенно ощущает нагрузки потока ветров. Таким образом, в дальнейшем требуется экспериментировать с геометрией передней части.

Выводы. При проведении анализа альтернативных источников было определено, что все они имеют свои достоинства и недостатки. При этом также было обнаружено, что некоторые концепции требуют математического и инженерно-технологического обоснования.

Впоследствии разработанная инновационная модель солнечно-ветрового комплекса сможет обеспечить электроэнергией промышленный объект. Немаловажной для такого комплекса является его технологическая конструкция, что в ближайшем будущем позволит улучшить безопасность окружающей среды.

Из-за того, что при расчётах не были учтены территориальные зоны и время года, его необходимо считать грубым расчётом. При дальнейшем анализе эти моменты и параметры установок будут учтены и пересчитаны, что позволит кон-

кретизировать выдаваемую электрическую мощность данного объекта.

Для более точного и конкретного решения поставленной задачи данного исследования будет смоделирован СВВК в пакете прикладных программ Matlab Simulink, по его математической модели, которую в дальнейшем требуется определить из закономерностей генерирования сол-

нечной и ветровой электроэнергии. Также будет исследоваться вопрос зависимости максимальной точки энергетической мощности от количества солнечных дней и ветровых суток. Эти данные необходимо будет получить с геометеорологических исследований территориальных границ, где предполагается применить данную технологическую установку.

Список литературы:

1. Инновации в энергетике, возобновляемая энергетика. URL: <http://renew.ru/>.
2. Гелиоэнергетика – основа будущего. URL: <http://community.hiblogger.net/ecotop/218415.html>.
3. Kasap S., Capper P. (Eds.). Solar Cells and Photovoltaics. Springer Handbook of Electronic and Photonic Materials. 2017. P. 1097–1109. DOI: 10.1007/978-3-319-48933-9_43
4. Соловей О.І., Лега Ю.Г., Розен В.П. Нетрадиційні та поновлювальні джерела енергії / за заг. ред. О.І. Солов'я. Черкаси: вид. ЧДТУ, 2007. 490 с.
5. Future Transportation. URL: <http://psipunk.com/tag/air-ship/>.
6. Чашко М.В., Зинов'єв С.М., Скрипник С.О. Застосування різних видів альтернативних джерел енергії у промислових цілях. Електронні та мехатронні системи: теорія, інновації, практика: матеріали III всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції (Полтава, 4–5 грудня 2017 р.). Полтава, 2017. С. 119–120.
7. Алтухова Т.В., Скрипник С.О. Моделювання та проектування сонячно-вітрового комплексу в пакетах прикладних програм SolidWorks та MatlabSimulink. Інформаційні технології в моделюванні: матеріали III всеукраїнської науково-практичної конференції, (Миколаїв, 22–23 березня 2018 р.). Миколаїв, 2018. С. 5–6.

СТВОРЕННЯ ІННОВАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ СОНЯЧНО-ВІТРОВОГО ПОВІТРЯНОГО КОМПЛЕКСУ ДЛЯ ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ

У статті проаналізовано інноваційні різновиди альтернативних систем електропостачання. Запропоновано нову модель генеруючого технологічного-енергетичного сонячно-вітрового повітряного комплексу. Показані приблизні розрахунки потужностей, які видаються установкою. Сконструйовано твердотілу 3D-модель сонячно-вітрового повітряного комплексу в програмі Solid Works Edition 2013. Зроблені дослідження в пакеті програм Flow Simulation і показані найбільш вразливі точки аеростата.

Ключові слова: офшорна енергетика, сонячно-вітрової повітряний комплекс, аеростат, турбінний вітрогенератор, Solid Work sEdition 2013, Flow Simulation.

CREATION OF THE INNOVATIVE MODEL OF THE SUNNY-WIND AIR COMPLEX FOR ENERGY SUPPLY OF INDUSTRIAL ENTERPRISES

The article analyzes innovative varieties of alternative power supply systems. A new model of the generating technological-energy complex of SWAC is proposed. Shown approximate calculations of capacity, issued by the installation. Constructed of solid-state 3D-model of solar-windair complex in the program Solid Works Edition 2013. Produced by the research in the software package Flow Simulation, and shows the most vulnerable points of the balloon.

Key words: offshore energy, solar-wind air complex, aerostat, turbine wind generator, SolidWorks Edition 2013, Flow Simulation.

Васюченко П.В.

Українська інженерно-педагогічна академія

Кирисов І.Г.

Українська інженерно-педагогічна академія

Чернюк А.М.

Українська інженерно-педагогічна академія

ОСОБЕННОСТИ ВНЕДРЕНИЯ МЕРОПРИЯТИЙ ПО СНИЖЕНИЮ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ УКРАИНЫ

В статье рассмотрены особенности комплексной политики энергосбережения за счет внедрения мероприятий по снижению потерь электрической энергии в электрических сетях действующих промышленных предприятий. Проанализированы особенности расчета потерь электрической энергии с учетом различных факторов.

Ключевые слова: система электроснабжения промышленных предприятий, потери электроэнергии, снижение потерь электроэнергии.

Постановка проблемы. Современное состояние системы электроснабжения (далее – СЭС) действующих промышленных предприятий (далее – ПП) Украины наглядно отображает проблемы, требующие реконструкции и технического переоснащения систем, совершенствование методов их эксплуатации. Причиной этого является морально и физически устаревшее электрооборудование, неудовлетворительное состояние и несоответствие мировым стандартам методов учета электроэнергии, неэффективное регулирование электропотребления. Потери электроэнергии в электрических сетях действующих ПП – один из основных показателей экономичности работы всей СЭС, эффективности электропотребления, состояния системы учета электроэнергии.

Проблема снижения потерь электроэнергии в элементах СЭС действующих ПП Украины остается актуальной, несмотря на заметное снижение фактических потерь мощности в последнее время (с 21% в 2001 г. до 13% в 2010 г. [2]). Эти показатели значительно превышают среднестатистические значения показателей промышленно развитых стран Европы (потери порядка 7% [2]).

Анализ последних исследований и публикаций. Структура фактических потерь электроэнергии при ее передаче в распределительных сетях может быть представлена в виде:

$$\Delta \mathcal{E}_{\text{факт}} = \Delta \mathcal{E}_{\text{норм}} + \Delta \mathcal{E}_{\text{сверх}} \quad (1),$$

где $\Delta \mathcal{E}_{\text{факт}}$, $\Delta \mathcal{E}_{\text{норм}}$, $\Delta \mathcal{E}_{\text{сверх}}$ – фактические, нормативные, сверхнормативные потери электроэнергии.

Фактические потери – это отчетные потери, определяемые по счетчикам как разница между поступлением электроэнергии в сеть ПП и полезной реализацией энергии собственными потребителями.

Нормативные потери – граничный показатель экономичности распределения и потребления электроэнергии при выполнении определенных регламентированных условий эксплуатации [1; 4]. Нормативные потери определяют расчетным путем.

Сверхнормативные потери вызваны нарушением технологии распределения и потребления электроэнергии в условиях эксплуатации:

- изношенностью оборудования (элементов сети, трансформаторов);
- низким качеством электроэнергии (несимметрия нагрузки, несинусоидальность формы кривой напряжения);
- неполнофазным режимом работы элементов сети;
- аварийными переключениями в распределительных сетях;
- избыточными перетоками реактивной мощности;
- низкой точностью учета потребления электроэнергии из-за погрешности измерительных приборов.

Эти нарушения ухудшают надежное и качественное электроснабжение потребителей и вызывают экономический ущерб [1; 2].

Изложение основного материала исследования. На практике в промышленных неразветвленных сетях со средоточенной нагрузкой технологические потери на передачу полезно отпущенной электроэнергии определяют с учетом сверхнормативных потерь соответствующими коэффициентами:

– степень влияния изношенности оборудования определяется коэффициентом износа $K_{изн} = 1,1$;

– при несимметрии загрузки в условиях отсутствия изменений тока по фазам коэффициент несимметрии применяют равным $K_{несим} = 1,05$;

– несинусоидальность формы кривой напряжения учитывается по коэффициентам прироста потерь от снижения качества электроэнергии, принимаемым в пределах $K_{кач} = 1,2$.

Учитывая относительную стабильность перечисленных коэффициентов, вышеуказанные нарушения выражают одним коэффициентом, определяемым для ПП выражением:

$$K_{mn} = K_{изн} \cdot K_{нес} \cdot K_{кач} = 1,1 \cdot 1,05 \cdot 1,2 = 1,38 \quad (2)$$

Тогда технологические потери на передачу полезно отпущенной электроэнергии определится по выражению:

$$\Delta E_{пп} = 1,38 \cdot K_{\phi}^2 \cdot \frac{E_{mn}^2 + W_{mn}^2}{U_{ном}^2 \cdot T} \cdot r_{mn} \cdot I_{mn} \quad (3),$$

где K_{ϕ} – коэффициент формы графика электрической нагрузки, зависящий от коэффициента непрерывности графика:

– при $K_{нерав} = P_{min} / P_{max} = 0,8 \dots 0,9$ $K_{\phi} = 1,01$

– при $K_{нерав} = P_{min} / P_{max} = 0,6 \dots 0,7$ $K_{\phi} = 1,03$

E_{mn} , W_{mn} – общий полезный отпуск соответственно активной и реактивной электроэнергии, $кВт \cdot ч$, $квар \cdot ч$;

T – продолжительность расчетного периода, часы (*сутки, 24 часа*);

r_{mn} – удельное активное сопротивление токоведущих частей (далее – ТВЧ), $Ом/км$;

l_{mn} – протяженность ТВЧ, км.

Кроме перечисленных, причинами значительных потерь электроэнергии во внутризаводских сетях являются и неоптимальные, неконтролируемые режимы работы как отдельных электроприемников, так и их групп, нерациональная конфигурация схем электроснабжения потребителей, неудовлетворительный коммерческий учет электроэнергии, плохое состояние материальной базы СЭС.

В связи с тем, что мероприятия по снижению потерь достаточно дороги, следует отдавать

предпочтение (особенно на действующих предприятиях) организационным мероприятиям, как правило, не требующим значительных затрат на их реализацию. Это – оптимизация загрузки электрооборудования при его эксплуатации, перераспределение нагрузки между цеховыми трансформаторами для обеспечения их оптимального коэффициента загрузки, ограничение работы электрооборудования на х.х., отключение незагруженных цеховых трансформаторов с переводом их нагрузки по автоматизированным переключателям низшего напряжения на оставшийся в работе трансформатор, сокращением длительности ремонтных и послеаварийных режимов.

Однако в современных условиях снизить потери электроэнергии во внутризаводских сетях возможно только путем существенных вложений в реконструкцию и модернизацию СЭС на всех ее ступенях и, в первую очередь, внедрения современного электрооборудования.

В общей структуре затрат электроэнергии на ее транспортирование и распределение часть потерь электроэнергии в трансформаторах превышает 20%.

Принципиально новым методом снижения потерь х.х. в трансформаторах является использование сверхпроводящих материалов. Внедрение высокотемпературных сверхпроводников дает возможность снижения нагрузочных потерь, снижения массы трансформаторов до 40%, ограничения токов к.з., снижения реактивного сопротивления и повышения в два раза нагрузочной способности трансформаторов; это так называемые энергосберегающие трансформаторы серии ТМГ-12.

Использование сверхпроводящих трансформаторов дает возможность совершенствовать СЭС ПП, снизить стоимость электроустановок, существенно повысить эффективность работы ПП.

Потери х.х. сопровождаются затратами в несколько раз большими, чем нагрузочные, и особенно значительны у трансформаторов малых мощностей. Отключение незагруженных цеховых трансформаторов в часы ночных провалов графика электрических нагрузок обеспечивает экономию электроэнергии, определяемую по выражению:

$$\Delta W_T \approx S_{HT} \cdot t_{откл} (5K + 0,5) / 100, \text{ кВт} \quad (4),$$

где S_{HT} – отключаемая трансформаторная мощность;

$t_{откл}$ – время отключения;

K – коэффициент, зависящий от числа ступеней трансформации, $K = 0,2 \div 0,8$.

Потери активной мощности в цеховых двухобмоточных трансформаторах определяют по выражению:

$$\Delta P_T = \Delta P_{X.X.} + K_3^2 \Delta P_{K.3.} + K_9 \frac{S_{H.TP.}}{100} (i_{X.X.} + K_3^2 U_{K.3.}), \text{кВт} \quad (5),$$

где

$\Delta P_{X.X.}, \text{кВт}; \Delta P_{K.3.}, \text{кВт}; i_{X.X.}, \%; U_{K.3.}, \%; S_{H.TP.}, \text{кВт}$ – каталожные данные трансформатора;

K_9 – экономический эквивалент реактивной мощности, определяемый при двухобмоточном силовом трансформаторе по выражению:

$$K_9 = \frac{2\Delta Q_{TP} + Q_{CP}}{U_{НОМ}^2} \cdot r_{(H)} \cdot 10^3, \text{кВт} / \text{Мвар},$$

где $\Delta Q_{TP} = \Delta Q_{X.X.} + K_3^2 \Delta Q_{K.3.}$

Особое внимание необходимо уделять снижению потерь электроэнергии в электрических сетях 0,4 – 10 кВ, протяженность которых значительна (60% протяженности всех электросетей Украины). На этом напряжении осуществляется электроснабжение конечного звена в СЭС ПП.

Снизить потери в ТВЧ возможно путем изменения топологии сети, переходом на систему глубокого ввода, дроблением ПС 10/0,4 кВ в целях снижения протяженности сетей 0,38 кВ; преимущественным использованием блочных и магистральных схем питания группы цеховых трансформаторов, перспективным переводом внутризаводской сети на более высокие уровни напряжения. Типовая современная схема внутрицеховой сети 0,4 кВ представлена на рис. 1.

Наиболее низкого уровня потерь можно достичь за счет внедрения самонесущих изолированных проводов (далее – СИП). Это даст возможность снизить потери электроэнергии до минимально возможных значений (в Финляндии в настоящее время более 80% низковольтных сетей выполнено с использованием СИП, потери в сетях составляют от 3 до 4%).

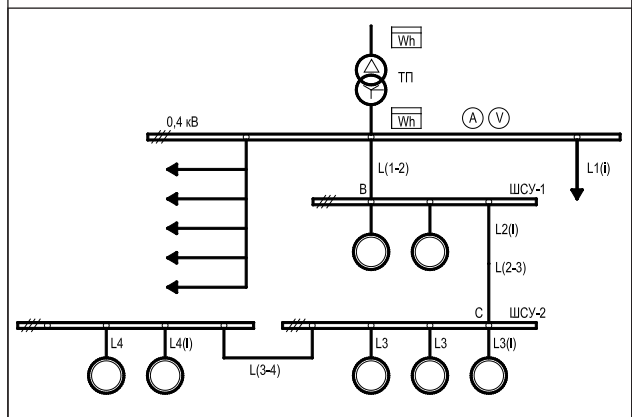


Рис. 1. Типовая схема внутрицеховой сети напряжением до 1 кВ

В нынешних условиях общие потери в кабельных линиях сети 0,4 кВ при рабочей температуре 65°C определяют по выражению:

$$\Delta P_{КЛ} = 3 \cdot K_{\Phi}^2 \cdot I_{CP}^2 \cdot R_{ЭК} \cdot \left(1 + 0,18 \frac{I_{CP}^2}{I_{MAX}^2} \right), \text{кВт} \quad (6),$$

где K_{Φ} – коэффициент формы графика потребления активной энергии трансформатора, рассчитываемый по формуле (3);

I_{CP} – средняя величина токовой нагрузки трансформатора за год;

$R_{ЭК}$ – эквивалентное сопротивление всех линий, отходящих от шин трансформатора (рис. 1) на стороне 0,4 кВ, определяют по выражению:

$$R_{ЭК} = \frac{1}{\sum Y_{l(i)}},$$

где $Y_{l(i)}$ – сумма проводимостей всех линий до 1 кВ.

Во внутризаводской сети действующих ПП наибольшие затруднения при расчете потерь в элементах систем возникают при оценке потерь в электродвигателях из-за отсутствия режимной информации о двигателях.

Потери мощности в асинхронных и синхронных двигателях напряжением 6 – 10 кВ определяют по выражению:

$$\Delta P_{ДВ} = P_H \left[K_1 (K_{3(ДВ)}^2 - 1) + 1 \right] \frac{1 - \eta_H}{\eta_H}, \text{кВт} \quad (7),$$

где P_H, η_H – соответственно номинальные значения мощности и КПД двигателя, принимаемые по каталожным данным;

$K_{3(ДВ)}$ – среднегодовой коэффициент загрузки двигателя по активной мощности, $K_{3(ДВ)} = \frac{P_{CP}}{P_H}$;

K_1 – коэффициент разделения потерь двигателя (разделение переменных и постоянных потерь в электродвигателях, учитывающих долю переменных потерь в общих потерях двигателя).

В практических расчетах значение величины K_1 определяют, пользуясь графиком зависимости $K_1 = f(P_H)$ [3, рис. 2.].

Аналогично рассчитывают потери активной мощности в электродвигателях напряжением до 1 кВ. Однако отсутствие метрологического обеспечения, не позволяющего оценить среднегодовой коэффициент загрузки каждого двигателя, допускает принимать в практических расчетах в качестве коэффициента загрузки всех низковольтных двигателей, питающихся от одного трансформатора, коэффициент загрузки этого трансформатора.

Тогда потери активной мощности в i -ом двигателе могут быть определены по выражению:

$$\Delta P_{ДВ} = P_{H(i)} \left[K_{1(i)} (K_{3(ТР)}^2 - 1) + 1 \right] \frac{1 - \eta_H}{\eta_H}, \text{кВт} \quad (8),$$

где $K_{1(i)}$ – коэффициент разделения потерь, определяемый в зависимости от номинальной мощности двигателя по графикам [2, рис. 2];

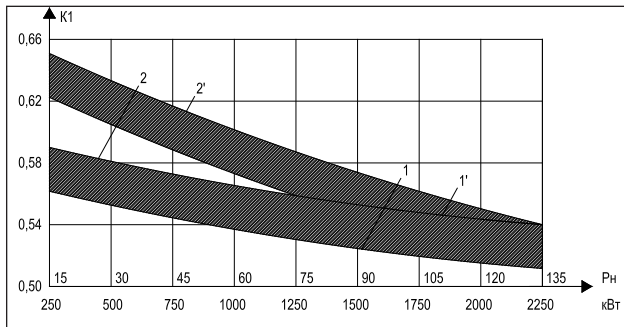


Рис. 2. Зона замещения переменной составляющей потерь для асинхронных и синхронных двигателей

$K_{з(ТР)}$ – коэффициент загрузки трансформатора, $K_{з(ТР)} = \frac{S_{сг(ТР)}}{S_{н.ТР}}$.

Так как нагрузка в сети до 1 кВ формируется некоторым (m) числом двигателей различной установленной мощности и с различным КПД, то при расчетах потерь активной мощности в низковольтных двигателях вводится понятие эквивалентной средней номинальной (установленной) мощности электродвигателей, питающихся от одного трансформатора. Мощность эквивалентного двигателя:

$$P_{H(э)} = \sum_1^m \frac{P_{Hi}}{n_{эф}}, \text{ кВт},$$

где $\sum_1^m P_{Hi}$ – сумма номинальных мощностей электродвигателей, питающихся от одного трансформатора;

$n_{эф}$ – приведенное (эффективное) число электродвигателей.

$$n_{эф} = \frac{\left(\sum_1^m P_{H(i)}\right)^2}{\sum_1^m P_{H(i)}^2}, \text{ шт.}$$

По номинальной мощности эквивалентного двигателя определяют его КПД по справочным данным.

Потери активной мощности всех m двигателей, подключенных к одному трансформатору, определяют по выражению:

$$\Delta P_{ДВ(ТР)} = \frac{1 - \eta_{H(э)}}{\eta_{H(э)}} [K_1 (K_{з(ТР)}^2 - 1) + 1] \cdot n_{эф} \cdot P_{H(э)}, \text{ кВт} \quad (9),$$

где K_1 – коэффициент разделения потерь, определяемый по графику (рис. 2) для эквивалентного двигателя.

Учитывая особенность структуры электропотребления, в которой существенную долю составляют технологические установки (ДСП, сварка, термообработка), во внутризаводской сети рекомендуется комбинированная (поперечная и продольная) компенсация реактивной мощности.

Значительную долю в общих потерях электроэнергии занимают коммерческие потери. Основное направление снижения коммерческих потерь – внедрение автоматизированных систем коммерческого учета электроэнергии с использованием электронных счетчиков класса 0,2, позволяющих производить многотарифный учет электроэнергии, дистанционное считывание показаний, коэффициентов, учитывающих нормируемые показатели качества электроэнергии и надежность работы узлов нагрузки.

Выводы. Снижение потерь электроэнергии во внутризаводских сетях достигается мероприятиями, компенсирующими нарушения технологии распределения и потребления электроэнергии, которые вызывают сверхнормативные потери.

Критерием эффективности мероприятий по снижению потерь электроэнергии является надежное, качественное и экономичное электрообеспечение потребителей.

Список литературы:

1. Гольстрем В.А., Кузнецов Ю.Л. Справочник по экономии топливно-энергетических ресурсов. Киев, 1985. С. 29–42.
2. Буцьо З.Ю., Мартинюк В.І. Аналіз втрат електричної енергії в електромережах усіх рівнів напруги в енергосистемах провідних зарубіжних країн та України. Енергетика та електрифікація. 2010. № 12. С. 15–17.
3. Железко Ю.С. Выбор мероприятий по снижению потерь электроэнергии в электрических сетях. Руководство для практических расчетов. Москва, 1988. С. 78–91.
4. Дерский В.Г. Выбор мероприятий по снижению потерь электроэнергии в распределительных сетях. Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. 2009. № 6. С. 20–21.

**ОСОБЛИВОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ ЗАХОДІВ ЩОДО ЗНИЖЕННЯ
ВТРАТ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ НА ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВАХ УКРАЇНИ**

У статті розглянуті особливості комплексної політики енергозбереження за рахунок впровадження заходів щодо зниження втрат електричної енергії в електричних мережах промислових підприємств. Проаналізовані особливості розрахунку втрат електричної енергії з урахуванням різних чинників.

Ключові слова: *система електропостачання промислових підприємств, втрати електроенергії, зниження втрат електроенергії.*

**FEATURES OF INTRODUCTION OF ACTIONS ON DECREASE
OF ELECTRIC ENERGY LOSSES AT INDUSTRIAL ENTERPRISES OF UKRAINE**

In the article the peculiarities of a comprehensive policy of energy conservation through the introduction of actions on decrease of electric energy losses in electric networks of existing industrial enterprises. Analyzed features of calculation of losses of electric energy taking into account various factors.

Key words: *power supply system of industrial enterprises, energy loss, energy loss reduction.*

УДК 621.224:681.511

Канюк Г.И.

Украинская инженерно-педагогическая академия

Мезеря А.Ю.

Украинская инженерно-педагогическая академия

Мельников В.Е.

Украинская инженерно-педагогическая академия

НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ И НОРМАТИВНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ГИДРОГЕНЕРАТОРНЫХ УСТАНОВОК

В статье рассмотрены вопросы, связанные с обеспечением необходимого качества электрической энергии, вырабатываемой на гидроэлектростанциях, повышением точности регулирования частоты и мощности гидроагрегатов. Выполнен параметрический синтез астатического регулятора системы автоматического регулирования частоты вращения гидротурбины на основе решения обратной задачи динамики. Проведен анализ существующего нормативно-методического обеспечения систем автоматического регулирования гидроагрегатов.

Ключевые слова: гидрогенератор, система автоматического регулирования, нормативное обеспечение.

Постановка проблемы. Электрическая энергия, которая производится гидроэлектростанциями, характеризуется рядом показателей качества, которые жестко регламентируются отечественными и зарубежными стандартами. Отклонение фактических показателей качества от регламентированных значений приводит к дополнительным потерям электроэнергии, снижению надежности и срока службы электрооборудования, а также к снижению эффективности или даже прямого нарушения технологических процессов потребителей.

Стабильность частоты электрического тока в электрической сети является одним из важнейших показателем качества электроэнергии. Этот показатель обеспечивается эффективностью работы систем автоматического регулирования частоты и мощности (далее – САР Ч и М) гидрогенераторных установок, а именно – показателями их статической и динамической точности, которые должны обеспечивать минимальное отклонение частоты вращения роторов гидрогенераторов от заданных режимных значений.

Повышение эффективности автоматического регулирования гидравлических турбин представ-

ляет собой важную и актуальную научно-техническую задачу, решение которой позволит повысить технико-экономические характеристики гидроагрегатов и обеспечить высокое качество электроэнергии, вырабатываемой гидравлическими электростанциями.

Постановка задания. Актуальным вопросом в современной энергетике является обеспечение необходимого качества электрической энергии. Основным показателем качества электрической энергии является отклонение частоты. Допуски на изменение частоты электроэнергии, вырабатываемой современными гидроагрегатами, а также на ее отклонение очень жесткие. По отечественным стандартам, максимально допустимые отклонения частоты для систем автоматического регулирования, оснащенных гидравлическими и электрогидравлическими регуляторами, находятся в пределах от 0,3 до 0,1%, в то время как по международным стандартам этот показатель не должен превышать 0,06% [1].

Отклонение частоты приводит к увеличению потерь активной мощности в электрических сетях и росту потребления активной и реактивной мощностей, недовыпуску промышленными предприятиями

продукции и увеличению дополнительного времени работы предприятия для выполнения задания. Известно, что снижение частоты на 1% увеличивает потери в электрических сетях на 2%. В связи с этим возникает вопрос поддержания частоты на необходимом уровне. За недопустимое отклонение частоты запускается механизм штрафных санкций [2].

Задача поддержания частоты в ее заданных значениях связана с различными факторами, такими как конструктивные особенности оборудования и система автоматического управления.

Особенно актуально эта задача стоит для ГЭС, так как станции этого типа работают в пиковой и полупиковой части графика электрических нагрузок, что подразумевает необходимость в частых переходных режимах.

В связи с тем, что в переходных режимах происходит отклонение частоты, возникает задача уменьшения длительности переходных процессов, при этом необходимо обеспечить качество электроэнергии на необходимом уровне, в частности удержать отклонение частоты в рамках допустимого диапазона, а это является непосредственной задачей САР Ч и М гидроагрегата.

Одной из особенностей энергетики Украины является наличие существенной неравномерности графиков электрических нагрузок [3]. В качестве примера на рис. 1. приведен характерный график электрических нагрузок для Украины.

Как видно из графиков, в энергосистеме Украины имеются значительные неравномерности не только суточных, но и годовых графиков нагрузок, большая часть – в пиковом и полупиковых режимах, которые берут на себя ГЭС и ГАЭС, обладающие высокой маневренностью и большим регулировочным диапазоном, высокими скоростями изменения нагрузок, минимальным временем набора нагрузки, пуска и остановки агрегатов.

При этом выполняются следующие задачи [5]:

- покрываются наиболее сложные пиковые и полупиковые части графика нагрузок. При этом ГЭС и ГАЭС при покрытии пиковой части графика нагрузки в среднем работают 2–5 часов в сутки, а полупиковой части графика – 5–15 часов в сутки;

- при работе в насосном режиме ГАЭС заполняет провальную часть графика нагрузок, снижая его неравномерность, и обеспечивает оптимиза-

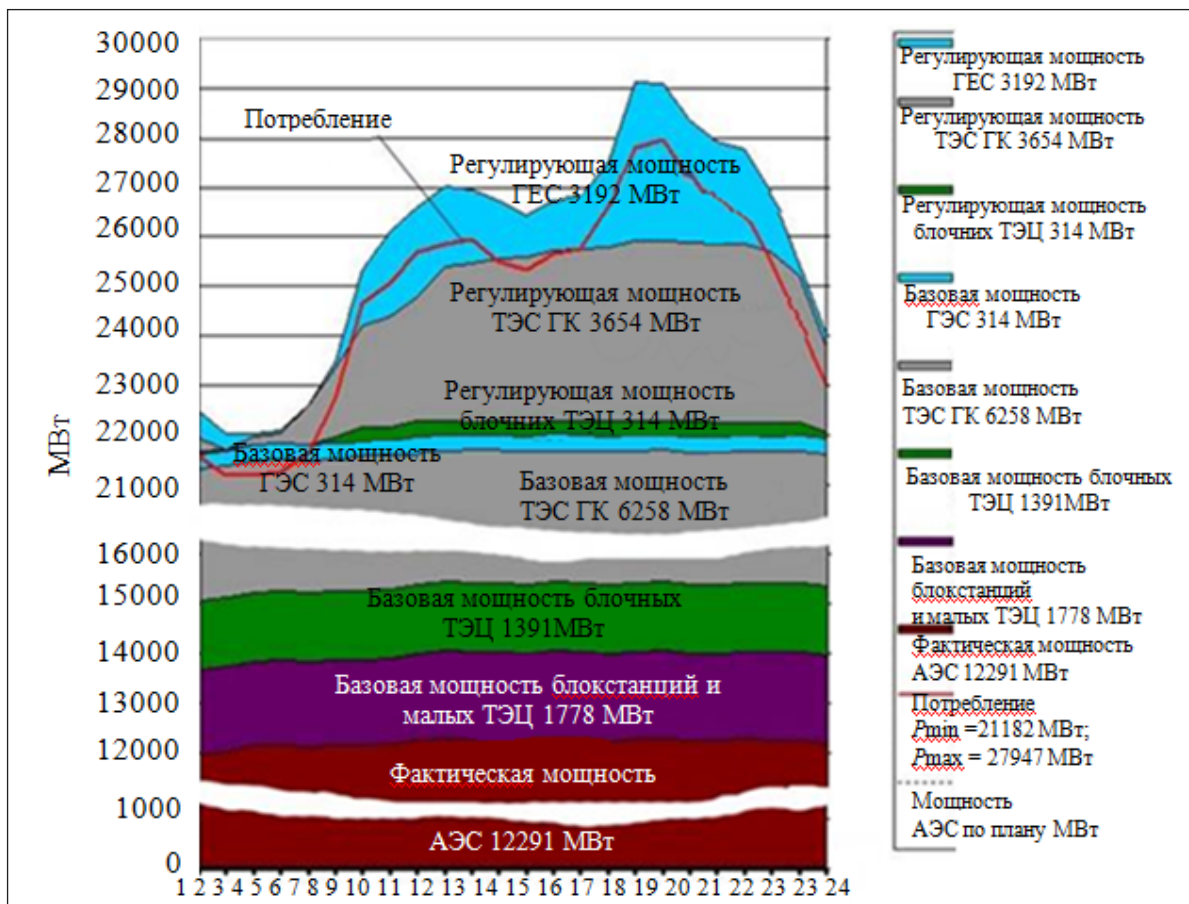


Рис. 1. Суточный график нагрузок в энергосистеме Украины

цию структуры генерирующих мощностей в энергосистеме за счет увеличения мощности базисных ТЭС и АЭС;

- выполняются функции аварийного и нагрузочного резервов энергосистемы;
- используются в качестве источников реактивной мощности.

Перечисленные выше задачи крайне необходимы для поддержания баланса мощностей в энергосистеме, особенно во время существенного дефицита и дороговизны энергетических ресурсов.

Так как ГЭС и ГАЭС лучше других электростанций приспособлены к быстрому изменению режимов работы, покрытию кратковременных пиков нагрузок, повышение точности регулирования частоты гидроагрегатов представляет собой важную и актуальную научно-техническую задачу [5; 6].

Анализ последних исследований и публикаций. Выполнена работа по разработке и внедрению системы автоматического регулирования гидротурбины, основанной на методе структурно-параметрического синтеза регулятора частоты и мощности гидротурбины на основе обратных задач динамики [7].

Теоретические исследования показали, что использование электронного регулятора, синте-

зированного на принципах обратных задач динамики, обеспечивает компенсацию всех видов статических и динамических ошибок электрогидравлического следящего привода (далее – ЭГСП) и их максимальное быстродействие, соответствующее предельному уровню энергетических возможностей системы. Так же было предложено использовать структуру астатического быстродействующего регулятора, построенного на принципах обратных задач динамики, объекта управления, для компенсации статических и динамических погрешностей системы регулирования.

Изложение основного материала исследования. *Параметрический синтез астатического регулятора системы автоматического регулирования частоты вращения гидротурбины на основе решения обратных задач динамики.* Параметрический синтез прецизионного регулятора осуществляется при помощи выбора стандартных характеристических полиномов, которые соответствовали следующему принятому функционалу оптимизации [8]:

$$I = \min \int |\varepsilon(t)| dt. \quad (1)$$

Выбор такого функционала обеспечивает приемлемый компромисс между статической и динамической точностью, при этом учитываются технологические ограничения: ограничения управляющего напряжения на входе (электроги-

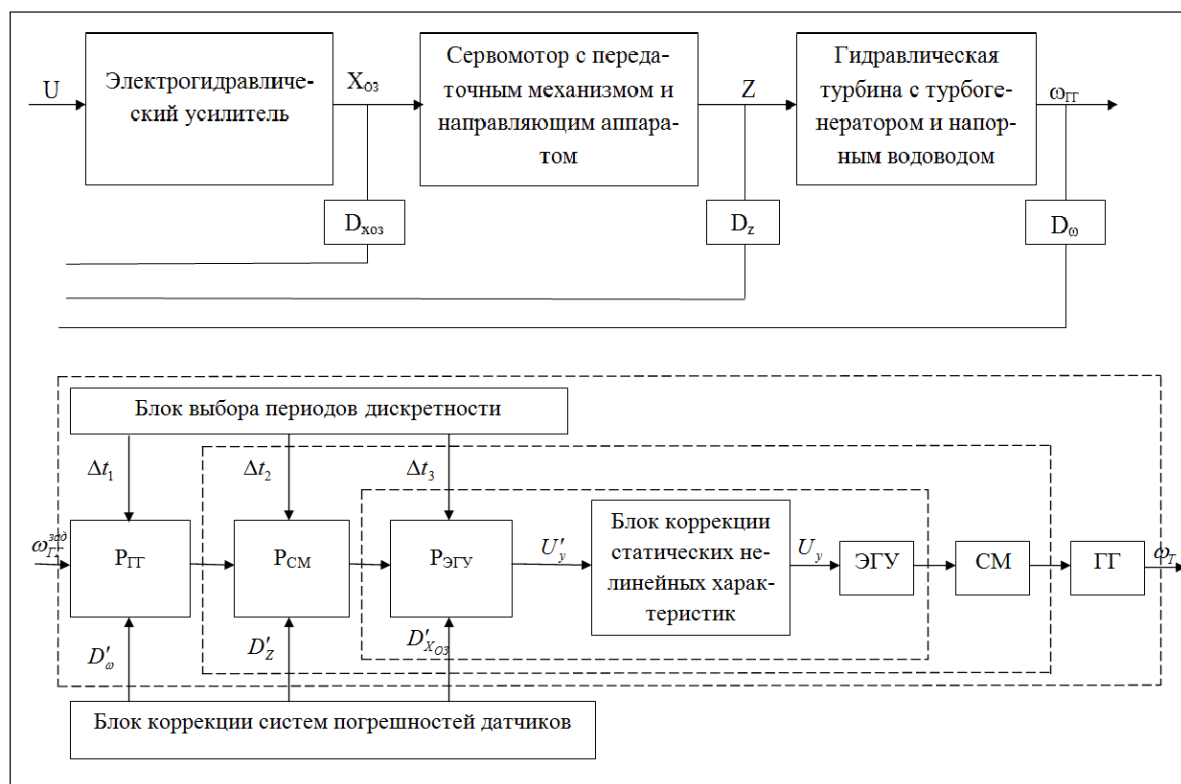


Рис. 2. Функциональная схема мультипликативного регулятора САР частоты вращения гидротурбины

гидравлический усилитель) и ограничения параметров электрогидравлического привода по давлениям, расходу и потребляемой мощности.

При этом накладываются технологические ограничения:

– ограничение управляющего напряжения на входе в электрогидравлический усилитель:

$$|U_y| \leq U_{\max}; \quad (2)$$

– ограничение параметров электрогидравлического привода:

$$P \leq P_{\max}; Q \leq Q_{\max}; N \leq N_{\max}. \quad (3)$$

Желаемый характеристический полином:

$$(n = 8; k = 1; N = n + k = 9); D^*(s) = s^{2N} + \sum_{l=0}^{2N-1} d_l^* s^l = 0. \quad (4)$$

Матричное соотношение для определения оптимальных значений параметров регулятора:

$$\begin{bmatrix} C_0 \\ C_1 \\ \dots \\ C_{N-1} \\ r_0 \\ r_1 \\ \dots \\ r_{N-1} \end{bmatrix}_{2N \times 1} = \begin{bmatrix} a'_0 & 0 & \dots & 0 & b_0 & 0 & \dots & 0 \\ a'_1 & a_0 & \dots & 0 & b_1 & b_0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a'_{N-1} & a'_{N-2} & \dots & a_0 & b_{N-1} & b_{N-2} & \dots & b_0 \\ a'_N & a'_{N-1} & \dots & a_1 & b_N & b_{N-1} & \dots & b_1 \\ 0 & a'_N & \dots & a_2 & 0 & b_N & \dots & b_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & a_N & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}_{2N \times 2N} \begin{bmatrix} a_{00} \\ a_{10} \\ \dots \\ a_{N0} \\ -a'_0 \\ \dots \\ a_{N-1,0} \\ -a'_{N-1} \end{bmatrix}_{2N \times 1} \quad (5)$$

Для практической реализации регулятора, упрощения настройки и отладки использовался принцип мультипликативного управления, в котором синтезируются регуляторы для каждого выделенного автономного контура (электрогидравлический усилитель, сервомотор, гидроагрегат). Функциональная схема мультипликативного регулятора САР частоты вращения гидротурбины изображена на рис. 2.

Поскольку выходы каждого контура подлежат непосредственному измерению при помощи датчиков перемещений и частоты вращения, то для каждого выделенного контура синтезирован отдельный регулятор меньшего порядка, а именно регуляторы первого и третьего порядка [8].

Векторно-матричное представление математических контуров управления:

$$\dot{\vec{X}} = A\vec{X} + B\vec{U}; \quad (6)$$

– Турбогенераторная установка с напорным водоводом:

$$\vec{X} = \begin{pmatrix} \omega_{гр} \\ Q \end{pmatrix}_{2 \times 1}; A = \begin{pmatrix} -\frac{1}{T_{гр}} & \frac{K_{МП}^Q}{T_{гр}} \\ 0 & -\frac{1}{T_{ВОД}} \end{pmatrix}_{2 \times 2}; \vec{U} = (NZ)_{2 \times 2}; B = \begin{pmatrix} -\frac{K_{МП}^N}{T_{гр}} & 0 \\ 0 & \frac{K_Z^Q}{T_{ВОД}} \end{pmatrix}_{2 \times 2} \quad (7)$$

– Сервомотор:

$$\vec{X} = \begin{pmatrix} X_{см} \\ V_{см} \\ \Delta P \end{pmatrix}_{3 \times 1}; A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -\frac{1}{T_{см}^{M^2}} & -\frac{2\xi_{см}}{T_{см}^M} & \frac{K_{\Delta P}^{X_{см}}}{T_{см}^{M^2}} \\ 0 & -\frac{K_{XP}}{T_{г}} & -\frac{1}{T_{г}} \end{pmatrix}_{3 \times 3};$$

$$\vec{U} = X_{ос}; B = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ K_{X_{ос}}^P \end{pmatrix}_{3 \times 1} \quad (8)$$

$$\vec{X} = \begin{pmatrix} X_{ос} \\ V_{ос} \\ i \end{pmatrix}_{3 \times 1}; A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -\frac{1}{T_{эгр}^{M^2}} & -\frac{2\xi_{эгр}}{T_{эгр}^M} & \frac{K_{X_{ос}}^i}{T_{эгр}^{M^2}} \\ 0 & 0 & -\frac{1}{T_{эгр}^3} \end{pmatrix}_{3 \times 3}$$

$$\vec{U} = X_{ос}; B = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{K_{iu}}{T_{эгр}^3} \end{pmatrix}_{3 \times 1} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \dot{X}_{ос} &= V_{ос}; \\ \dot{V}_{ос} &= -\frac{1}{T_{эгр}^{M^2}} X_{ос} - \frac{2\xi_{эгр}}{T_{эгр}^M} V_{ос} + \frac{K_{X_{ос}}^i}{T_{эгр}^3} i \\ \dot{i} &= -\frac{1}{T_{эгр}^3} i + \frac{K_{iu}}{T_{эгр}^3} U; \end{aligned} \quad (11)$$

Структурно-параметрический синтез унифицированного мультипликативного регулятора частоты вращения гидротурбины:

– Схема регулятора третьего порядка. Астатические регуляторы контуров управления электрогидравлическим усилителем и сервомотором:

$$\begin{bmatrix} C_0 \\ C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ r_0 \\ r_1 \\ r_2 \\ r_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & b_0 & 0 & 0 & 0 \\ a_0 & 0 & 0 & 0 & b_1 & b_0 & 0 & 0 \\ a_1 & a_0 & 0 & 0 & b_2 & b_1 & b_0 & 0 \\ a_2 & a_1 & a_0 & 0 & 0 & b_2 & b_1 & b_0 \\ 1 & a_2 & a_1 & a_0 & 0 & 0 & b_2 & b_1 \\ 0 & 1 & a_2 & a_1 & 0 & 0 & 0 & b_2 \\ 0 & 0 & 1 & a_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} a_{n0} \\ a_{n1} \\ a_{n2} \\ a_{n3} \\ a_{n4} \\ a_{n5} - a_0 \\ a_{n6} - a_1 \\ a_{n7} - a_2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

– Схема регулятора второго порядка. Астатический регулятор контура управления частотой вращения гидротурбины:

$$\begin{bmatrix} c_0 \\ c_1 \\ c_2 \\ r_0 \\ r_1 \\ r_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & b_0 & 0 & 0 \\ a_0 & 0 & 0 & b_1 & b_0 & 0 \\ a_1 & a_0 & 0 & b_1 & b_0 & 0 \\ 1 & a_1 & a_0 & 0 & b_1 & b_0 \\ 0 & 1 & a_1 & 0 & 0 & b_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} a_{H0} \\ a_{H1} \\ a_{H2} \\ a_{H3} \\ a_{H4} - a'_0 \\ a_{H5} - a'_1 \end{bmatrix} \quad ((13))$$

Реальные практические результаты в решении этой задачи можно получить, создав системную научно-техническую и нормативную базы, обеспечивающие создание и промышленное внедрение прецизионных САР Ч и М гидрогенераторных установок, которые способны поддержать заданную точность и стабильность частоты вырабатываемого электрического тока, а также установленную мощность энергоблоков [9].

Анализ существующего нормативно-методического обеспечения систем автоматического регулирования гидроагрегатов. Сегодня существует нормативно-техническая документация, касающаяся вопросов регулирования обратимых гидравлических машин. В ней освещены вопросы автоматического регулирования, поддержания частоты и мощности, настройки регуляторов, расчет технико-экономических показателей, а также методов и средств обеспечения.

В то же время западноевропейские энергосистемы (UCTE и др.) первичного и вторичного регулирования обеспечивают более высокое качество регулирования частоты. Согласно нормам UCTE, регулирование частоты нормируется величиной и временем готовности к использованию резервов, коэффициентом статизма и зоной нечувствительности систем автоматического регулирования агрегатов ГЭС [10; 11]:

– обеспечение первичного регулирования частоты в системе за счет регулировочного резерва мощности не менее 2,5% текущей нагрузки и его готовность к использованию от 5 до 30 с. Коэффициент статизма агрегатов для ГЭС – 2–6%;

– обеспечение вторичного регулирования частоты в объеме мощности наиболее крупного генерирующего блока (1 000 МВт) в течение нескольких минут (до 5 мин). К нему относятся изменения мощности включенных агрегатов, выполняемые оперативно персоналом либо воздействием АРЧМ.

Указанные требования значительно отличаются от требований, приведенных в Правилах технической эксплуатации электрических станций и сетей Украины [11; 12], а также в ряде других основополагаю-

щих нормативных документов, касающихся вопросов регулирования гидравлических электростанций.

Приведение выделенной части электростанций к современным требованиям по первичному и вторичному регулированию требует значительных затрат на их модернизацию и может быть реализовано только за счет сочетания технических требований к регулированию частоты в условиях конкурентного рынка электроэнергии, методологии ценообразования на рынке регулирования частоты и организации рынка регулирующей мощности [13].

Общие технические требования определены только к тем управляющим подсистемам АСУ ТП ГЭС, по которым накоплен достаточно большой опыт их функционирования. Эти подсистемы реализованы на традиционных средствах и лишь в ограниченном количестве – на современных средствах вычислительной техники [14].

Применение современной вычислительной техники позволяет расширить функциональные возможности системы управления и выполнять функции, не характерные для аналоговых систем. Поэтому при разработке АСУ ТП представленные в этом документе требования могут быть дополнены с учетом потребностей конкретной ГЭС и возможностей используемой техники.

Выводы. Выполнен параметрический синтез прецизионного регулятора при помощи выбора стандартных характеристических полиномов. Использован принцип мультипликативного управления, в котором синтезируются регуляторы для каждого выделенного автономного отдельного контура.

На сегодняшний день в нормативно-технической и нормативно-методической документации не достаточно полно сформулированы универсальные нормативные методы структурно-параметрического синтеза прецизионных САР гидроагрегатов, которые гарантированно смогли бы обеспечить высокие показатели точности регулирования частоты вращения и мощности. В имеющейся документации по системам автоматического регулирования гидравлических турбин не достаточно полно сформулированы системные и количественные требования показателей, а также методы и средства их гарантированного технического обеспечения [15].

Для составления такой документации необходимо выполнить цикл теоретических и экспериментальных научных исследований, которые будут включать в себя математическое моделирование технологического процесса и оборудования, идентификацию математических моделей по результатам экспериментальных исследований, структурный и параметрический синтез прецизионных регуляторов.

Список літератури:

1. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Москва, 1999. 33 с.
2. Нормы качества электрической энергии. Электроэнергетика. URL: <http://forca.com.ua/info/spravka/normy-kachestva-elektricheskoi-energii.html>.
3. Маляренко В.А., Маляренко В.А., Колотило І.Д., Нечмоглод І.Є. Нерівномірність графіка навантаження енергосистеми і способи його вимірювання. Реалізації. Енергозбереження, енергетика, енергоаудит. 2011. № 5 (87). С. 19–22.
4. Плачков И.В., Дунаевская Н.И., Подгуренко В.С. Книга 3. Развитие теплоэнергетики и гидроэнергетики. Киев. 2012. URL: <http://energetika.in.ua/ru/books/book-3/part-2/section-2/2>.
5. Музей гидроэнергетики УПИЦ. Углич. 2005. URL: http://www.hydrmuseum.ru/ru/encyclopedia/glossary/Grafik_nagruzki_obesp_srednesut_mosch.
6. Канюк Г.И., Мезеря А.Ю., Мельников В.Е. Прецизионная система автоматического регулирования гидротурбины. Вестник НТУ «ХПИ» сб. науч. тр. Темат. вып. Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. Харьков. НТУ «ХПИ». 2015. № 17 (1126). С. 91–96.
7. Мельников В.Е. Параметрический синтез астатического регулятора САР частоты вращения гидротурбины на основе решения обратной задачи динамики. Материалы XXIII межд. науч. конф. (автоматика-2016). Сумы. 2016. С. 94–95.
8. Канюк Г.И., Мезеря А.Ю., Мельников В.Е. Параметрический синтез астатического регулятора САР частоты вращения гидротурбины на основе решения обратной задачи динамики. НТУ «ХПИ» Адаптивні системи автоматичного управління. Киев, 2018.
9. Шавлович З.А. Совершенствование конструкции и режимов работы гидравлических приводов в системах регулирования гидротурбин: автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 05.04.13. Санкт-Петербургский гос. политехн. ун-т. Санкт-Петербург, 2004.
10. UCTE Operation Handbook. Policy 1: Load-Frequency Control and Performance. Final policy 2.2 E, 2004. URL: https://docuri.com/download/ucte-policy1-v22-load-frequency-control-and-performance_59c1e651f581710b286be8c8_pdf.
11. Бондаренко Ю.Н. Опыт внедрения наукоемких технологий в систему управления гидроэлектростанций с целью повышения их надежности и эффективности работы в ОЭС Украины. Корпорация «МАСТ-ИПРА». 2010. URL: <http://docplayer.ru/29672523-Modernizaciya-sistemy-kontrolya-i-upravleniya-energobloka-1-zuevskoy-tes-ooo-vostokenergo.html>.
12. Техническая эксплуатация электрических станций и сетей. Правила. Отраслевой резервно-инвестиционный фонд развития энергетики. Издание первое. Львов. 2002. 323 с. URL: http://rza.org.ua/down/open/tehnicheskaya-ekspluatatsiya-elektricheskikh-stantsiy-i-setey-pravila_31.html.
13. О повышении качества первичного и вторичного регулирования частоты электрического тока в ЕЭС. Отраслевой резервно-инвестиционный фонд развития энергетики. Москва, 2002. 78 с. URL: <http://www.enersys.ru/wp-content/uploads/2009/09/prikaz.doc>.
14. РД 153-34.0-35.519-98. Общие технические требования к управляющим подсистемам агрегатного и стационарного уровней АСУ ТП ГЭС. Москва, 1999. 14 с.
15. Канюк Г.И. Прецизійні системи автоматичного регулювання турбогенераторних установок. Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит. 2014. № 11. С. 12–27.

**НАУКОВЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ТА НОРМАТИВНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ
ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО
РЕГУЛЮВАННЯ ГІДРОГЕНЕРАТОРНИХ УСТАНОВОК**

У статті розглянуті питання, пов'язані із забезпеченням необхідної якості електричної енергії, що виробляється на гідроелектростанціях, підвищенням точності регулювання частоти і потужності гідроагрегатів. Виконано параметричний синтез астатичного регулятора системи автоматичного регулювання частоти обертання гідротурбіни на основі розв'язання обернених задач динаміки. Проведено аналіз наявного нормативно-методичного забезпечення систем автоматичного регулювання гідроагрегатів.

Ключові слова: гідрогенератор, система автоматичного регулювання, нормативне забезпечення.

**SCIENTIFIC SUBSTANTIATION AND NORMATIVE SUPPORT
OF ENERGY EFFICIENT OPERATING MODES OF AUTOMATIC
REGULATION SYSTEMS OF HYDROGENERATOR UNITS**

The article deals with issues related to ensuring the required quality of electric energy produced by hydroelectric power stations, increasing the accuracy of frequency and power control of hydraulic units. A parametric synthesis of the astatic regulator of the system for automatic control of the speed of a hydroturbine is performed on the basis of solving the inverse problem of dynamics. The analysis of the existing normative and methodical support of automatic control systems for hydraulic units is carried out.

Key words: hydrogenerator, automatic control system, regulatory support.

Крот О.П.

Харківський національний університет будівництва та архітектури

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ СМІТТЄСПАЛЮВАЛЬНИХ УСТАНОВОК ЗА РЕКОМЕНДАЦІЯМИ ДИРЕКТИВИ ЄВРОПЕЙСЬКОГО СОЮЗУ

Утилізація твердих побутових відходів є проблемою для більшості українських муніципалітетів. Відповідно до сучасних світових тенденцій поводження з відходами, спалювання відходів з отриманням енергії дозволяє знизити вплив на навколишнє середовище. У статті розглядається можливість проектування сміттєспалювальних підприємств в Україні за вимогами директиви 2008/98/ЕС. Наводиться формула розрахунку енергетичної ефективності для сміттєспалювальних установок, так звана «формула R1», яка втілює термін «відходи в енергію». Основними параметрами, що збільшують значення R1, є виробництво теплової та електричної енергії від спалювання відходів.

Ключові слова: побутові відходи, термічне знешкодження, енергоефективність, теплотворна здатність, енергія з відходів.

Постановка проблеми. Утилізація твердих побутових відходів (далі – ТПВ) є проблемою для більшості українських міст. Основна маса ТПВ без попереднього оброблення (сортування) викидається на звалища, що спричиняє негативні екологічні наслідки. Згідно зі ст. 32 «Про заходи щодо обмеження та запобігання негативному впливу відходів» Закону України «Про відходи», забороняється з 1 січня 2018 р. захоронення на полігонах необроблених побутових відходів. Термічне оброблення ТПВ із рекуперацією енергії є альтернативним методом.

Спалювання відходів, зокрема, відновлення тепла, застосовується в більш ніж 450 енергетичних об'єктах по всій Європі і в багатьох країнах світу загалом. За даними Євростату, 2014 р. середня кількість відходів на 1 людину становила 465 кг. 98% із них були оброблені в різний спосіб, серед них: 28% поховані, 28% перероблені, 27% спалені, а 15% компостовані (середнє значення по Європейському Союзу (далі – ЄС)).

Під час управління ТПВ необхідно враховувати такі аспекти: будь-яка урбанізована територія генерує багато відходів, наявні методи утилізації ТПВ мають недоліки соціального, економічного й екологічного планів. Склад відходів, що утворюються, надзвичайно нестабільний через сезонні коливання, спосіб життя населення, демографічну структуру, географічний стан і законодавчі рішення. Теплотворну здатність ТПВ вивчали багато авторів [1; 2]. Було встановлено, що теплотворна здатність зале-

жить від морфологічного складу, вологості і зольності відходів і коливається в широкому діапазоні від 4 до 15 МДж/кг.

Технології, які використовують потоки відходів для виробництва енергії, визначаються як «енергія з відходів» (“energy from waste”). Але «відходи в енергію» “waste-to-energy” – це термін, який стосується виробництва енергії за допомогою термічного оброблення безпечних відходів. Хоча нові термічні процеси, як-от газифікація і піроліз, стають все більш популярними, термін «відходи в енергію» в основному стосується спалювання твердих побутових відходів. Усі Директиви про відходи, ухвалені Європейською комісією, поділяють стратегії управління відходами на операції з відновлення й операції з видалення (ліквідації). У цьому контексті важливо зазначити, що «відновлення» означає будь-яку діяльність, основним результатом якої є технологічне оброблення відходів, що включає вилучення та відновлення цінних компонентів відходів, з поверненням їх для повторного використання або отримання енергії.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. До оцінки ефективності роботи сміттєспалювальних заводів можна підходити по-різному. Наприклад, із застосуванням багатокритеріального аналізу ефективність установок визначається декількома чинниками: продуктивністю, трудомісткістю, безпекою. Є методики, які враховують витрату умовного палива – це актуально для теплогенеруючих установок, що працюють на традиційному паливі.

Також ефективність спалювання відходів можна оцінювати за повнотою згоряння, аналізуючи гази, що відходять.

В ЄС ефективність спалювання відходів оцінюється згідно з Директивою про відходи [3], яка набрала чинності 2008 р. і позиціонує сміттєспалювальні заводи муніципальних відходів як операцію з відновлення, за умови, що вони відповідають визначеним критеріям. Метою цього є сприяння використанню відходів для виробництва енергії в енергоефективних сміттєспалювальних установках і заохочування інновацій у термічне знешкодження відходів. Невичерпний перелік операцій з відновлення, представлених у Додатку II [3], основним ядром яких є формула R1. Вона визначає сміттєспалювальну установку як операцію з відновлення енергії – «відходи використовувати передусім як паливо або інші засоби для вироблення енергії». Пояснюється, що сюди відносять установки для спалювання, призначені для перероблення твердих побутових відходів, тільки якщо їхня ефективність використання енергії дорівнює або перевищує: 0,60 – для установок, що експлуатуються і відповідають вимогам Директиви [3], а отже, отримали дозвіл до 1 січня 2009 р., та 0,65 – для установок, дозволених після 31 грудня 2008 р.

Незважаючи на велике значення формули R1, аналіз наукових досліджень у попередньому огляді показав відсутність інформації про вплив різних параметрів на значення R1. Була вивчена обмежена роль таких чинників, як клімат, енергетичний вміст відходів, морфологічний склад відходів, границі системи та налаштування установки.

Метою дослідження [4] було виявлення та кількісне визначення параметрів і чинників, що впливають на ефективність формули R1 для установок «енергія з відходів», шляхом дослідження всіх невизначеностей у розрахунках. Ключовою частиною проекту було визначення того, наскільки нестабільність параметрів, що містить формула R1, впливає на кінцевий результат. Встановлено, що енергоефективність більш чутлива до зміни нижчої теплоти згоряння відходів і до валової електричної ефективності.

Другим аспектом проекту [4] було дослідження взаємозв'язку між електричною ефективністю та тепловою ефективністю. Результати показують, що електричний та тепловий коефіцієнти корисної дії (далі – ККД) є зворотно пропорційними.

Визначено дві взаємозалежності між тепловою ефективністю й електричним ККД: одним лінійним і одним поліномом. Формула R1 має наслідки для проектування й експлуатації установок, що виробляють енергію з відходів. Занепокоєння

викликають також чинники, які на даний момент не враховуються, як-от клімат у районі розташування проектного об'єкта, розташування заводу та точні межі системи, що використовуються для розрахунку значень формули R1.

У статті [5] експериментально проаналізовано ефективність італійської установки «енергія з відходів» невеликого розміру, що виробляє тільки електричну енергію. Сміттєспалювальний завод працює в центральній Італії із 2000 р. і обробляє в середньому майже 42 000 т залишкових відходів на рік. Відходи із середньою швидкістю приблизно 130 т/добу завантажуються на сітку, розташовану на дні адіабатичної камери згоряння. Енергоефективність наявних відходів для енергетичної установки була досліджена на відповідність Директиві [3]. На момент розрахунку енергоефективності сміттєспалювальний завод виробляв тільки електричну енергію від спалювання відходів паровою турбіною і результат, за формулою R1, був приблизно 0,44.

Новий європейський критерій ефективності R1 приведе до розроблення та впровадження оптимізованих процесів – систем із підвищеною енергоефективністю, що, у свою чергу, вплине на утворення парникових газів із різних процесів поводження з відходами в Європі. Перспективними технологіями є: збільшення параметрів пару, зниження споживання енергії на сміттєспалювальному заводі і спільне використання тепла й електроенергії. У роботі [6] наведено критичний аналіз впливу ефективності рекуперації енергії на баланс парникових газів на основі даних наявних установок. Наприклад, в Австрії немає особливого критерію ефективності, але є загальна нормативна потреба в комбінованому виробленні тепла й електроенергії, яка включає виробництво тепла й електроенергії на заводах з отримання енергії з відходів. В Японії майже 74% із 48,1 млн. т муніципальних твердих відходів спалюються на 1 269 теплових заводах. 2009 р. Міністерством навколишнього середовища Японії в країні введений «План сприяння формуванню розуміння суспільством важливості рециркуляції відходів у фінансовому році». У цьому плані описується схема субсидування для установок, які переробляють відходи в енергію: 50% інвестицій покривається урядом, якщо будуть досягнуті певні межі енергоефективності.

У роботі [7] розроблена трапецієподібна радарна діаграма, яка забезпечує загальне рішення для всіх установок, що перетворюють відходи на енергію. Особливу увагу автори приділяють процесам газифікації й піролізу. Але ці технології більш підходять

для таких відходів, як пластмаси, резина тощо. Піроліз не рекомендується для загальних муніципальних відходів. Згідно з поясненнями до Директиви [8], сміттєспалювальні установки, призначені для спалювання муніципальних відходів, являють собою установки для спалювання відходів, які мають дозвіл і технічно розроблені так, щоб сприяти спалюванню змішаних твердих побутових відходів.

Дослідження [9] присвячено питанням управління відходами й енергоресурсами на Тайвані. Зокрема, розглядається спалення ТПВ як життєздатна технологія для виробництва теплової та електричної енергії. У Тайвані працюють 24 підприємства з перероблення відходів в енергію – це найвища густина сміттєспалювань ТПО (кількість сміттєспалювальних заводів на земельну ділянку) у світі. Загальний проектний потенціал потужності цих 24 заводів становить 558,5 МВт. У разі повної реалізації потужностей підприємств це може принести дохід у розмірі понад 167 мільйонів доларів Сполучених Штатів Америки (далі – США) на рік. ТПО Тайваню має високу теплотворну здатність (1,873 ккал/кг) та низький вміст води (53,4%), що робить його цінним джерелом відновлюваної енергії. Приблизно 6,5 мільйонів тонн на рік ТПВ у даний час спалюються для відновлення енергії та скорочення відходів. Автори дослідження застосовують формулу R1 до сміттєспалювальних заводів Тайваню і вважають, що конструкція пристрою з виробництва енергії, потужність та низька теплотворна здатність є важливими параметрами проектування об'єктів спалювання.

Постановка завдання. Мета статті – дослідження можливості використання формули енергоефективності для проектування нових сміттєпереробних заводів в Україні.

Виклад основного матеріалу. Розглянуто основні складники формули для розрахунку енергоефективності. Відповідно до Додатка II Рамкової директиви про відходи (European Commission. (2008). Directive 2008/98 / EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives. Brussels, Belgium), для розрахунку енергоефективності пропонується використовувати формулу R1:

$$R1 = \frac{E_p - (E_f + E_i)}{0,97(E_w + E_f)}, \quad (1)$$

де E_p – це кількість енергії, виробленої сміттєспалювальною установкою щорічно у вигляді електроенергії і тепла, в ГДж/рік або МВт*годину/рік.

Для обчислення E_p використовуються два чинники еквівалентності, як визначено в документі

(Додаток II, WFD 2008/98 / EC). Кількість виробленої електроенергії E_{el} множиться на 2,6, тоді як кількість тепла – на 1,1 Eth. Чинник 2,6 для електрики заснований на середньому європейському коефіцієнті вугільних установок із 38%, що означає потребу в енергії 2,6 кВт*години для виробництва 1 кВт*години електроенергії. Чинник 1,1 для генерованого тепла заснований на середньому європейському коефіцієнті теплових установок 91%. Отже, E_p розраховується так:

$$E_p = 2,6 \cdot E_{el} + 1,1 E_{th}, \quad (2)$$

де E_f – це кількість енергії, яка щорічно імпортується в систему. Це ефективна енергія від спалювання відходів, а також від використання звичайних видів палива для розігріву, у ГДж/рік або МВт*годину/рік. Для розрахунку E_f (3) має бути обчислена чиста теплотворна здатність палива Q_i у кДж/кг] і розрахована кількість палива m , яке використовується для запуску і зупинки процесу спалювання, зокрема й паливо для підтримки необхідних температур із використанням допоміжних пальників:

$$E_f = \sum_{i=1}^n m_{f,i} \cdot Q_i, \quad (3)$$

де E_w – це річна енергія, що міститься в оброблених відходах, у ГДж/рік або МВт*годину/рік, розрахована з використанням чистої теплотворної здатності ТПВ Q_w та щорічного надходження відходів M_w :

$$E_w = M_w \cdot Q_w, \quad (4)$$

де E_i – це щорічно імпортована енергія, крім E_w і E_f , у ГДж/рік або МВт*годину/рік, яка складається з постачання електроенергії, пари або гарячої (охолодженої води) тощо, які необхідні для ефективної роботи установки.

0,97 – це чинник, який кількісно визначає втрати енергії внаслідок випромінювання і зольності.

Теплотворна здатність ТПВ Q_w в основному залежить від морфологічного складу, вологості та зольності відходів. Усереднений склад муніципальних відходів представлений у таблиці 1.

Морфологічний склад ТПВ може змінюватися залежно від сезону, від кліматичних характеристик, від рівня життя населення та від суворості законодавства. ТПВ складаються з десятків різноманітних речовин, які, у загальному вигляді, можна розподілити на чотири основних категорії, а саме: папір (25%), пластмаса (19%), харчові відходи (27%), садові відходи (29%). Останнім часом вміст пластику та гуми істотно збільшився, а кількість харчових відходів знизилась. Результати елементного аналізу ТПВ показані в роботі [10].

Відходи зазвичай мають високий вміст вуглецю і помірний вміст водню, що вказує на хороший енергетичний потенціал. Вміст хлору є нижчим 1% для всіх видів відходів.

Таблиця 1

Усереднений склад муніципальних відходів

Тверді побутові відходи	Вміст, %
Папір	6,8...9,4
Картон	4,4...7,6
Великогабаритний картон	2,3...5,5
Харчові відходи	12,5...16,9
Садові відходи	9,4...11,5
Пластик	13,8...18,3
Текстиль	8,5...9,1
Шкіра	0,3...2,3
Метал	0,7...2,9
Скло	0,2...2,4
Гума	8,4...14,1
Негорючі відходи (каміння)	5,2...6,3
Інші горючі	11,4...12,7
Вологість відходів	32...60
Зольність	12...50

Якщо проводити сортування відходів, то їхня теплотворна здатність збільшується, оскільки відсортовуються такі речовини, як скло, метал, які знижують ефективність процесу спалювання. Щоб використовувати ТПВ як енергоносії, необхідно дослідження показників вологості та зольності.

Теплотворна здатність ТПВ у табл. 2. наведена з розрахунку на сухий залишок для випадку, коли волога конденсується в газоподібних речовинах – так звана вища теплотворна здатність. Кількість тепла, що виділяється з вологих компонентів відходів, розраховується множенням відповідного значення для сухих компонентів на значення вмісту в них вологи.

Таблиця 2

Питома теплота згоряння окремих компонентів муніципальних відходів

Тверді побутові відходи	МДж/кг
Папір	12,1...19,7
Картон	17,9
Великогабаритний картон	17,3
Харчові відходи	19,2
Садові відходи	19,3
Пластик	21,8...43,2
Текстиль	16,6...18,47
Шкіра	18,2...20,3
Метал	1,35
Скло	0,16
Гума	19,1...25,6

Для порівняння, теплотворна здатність торфу – 5,5 МДж/кг, кам'яного вугілля – 26,7 МДж/кг.

Наведемо приклад розрахунку за формулою R1 установки, яка містить: системи прийому, транспортування і завантаження сміття; подачі палива; подачі лужного розчину; обертову піч; систему газовідвідного тракту; систему видалення, транспортування шлаку й уловленого пилу; теплоутилізаційну станцію; компресорну станцію; водопідготовчу установку; систему контролю і керування. Установка є традиційною, наприклад, для Харківської області: продуктивністю 1 000 кг/годину, за умови виробництва електроенергії 25 кВт/год., середня теплотворна здатність відходів – 6 476,832 кДж/кг за вологості 60%, використання додаткового дизельного палива – 20 кг/год., питома витрата електроенергії – 70 кВт/год.

$$R1 = \frac{E_p - (E_f + E_i)}{0,97(E_w + E_f)} = \frac{(43536 \cdot 1,1 + 7884 \cdot 2,6) - (7533 + 22075)}{0,97(57000 + 7533)} = 0,62.$$

Висновки. Під час роботи проаналізовані складники формули R1. Вираз має деякі невідповідності, які розглянуті декількома дослідниками з моменту її введення. По-перше, формула не є термодинамічно коректною. У розрахунку за формулою R1 враховується ефективність використання енергії спалювання ТПВ, а не чиста вироблена енергія. Показник «Вироблена енергія» відносять до валового виробництва енергії, а не до виробництва чистої енергії, а з іншого боку, той факт, що електрика або тепло надходять в мережу, не обов'язково означає, що вони будуть використовуватися, з огляду на віддаленість сміттєпереробних підприємств. У визначенні членів E_f та E_w є кілька двозначностей. E_p розраховується з використанням енергії у вигляді електрики, помноженої на 2,6, і тепла, виробленого для комерційного використання, помноженого на 1,1. Але коефіцієнти 2,6 і 1,1 не мають термодинамічної сенсу, як і коефіцієнт 0,97. Для досягнення статусу R1 необхідне значне виробництво тепла. Під час виробництва теплової та електричної енергії (основні параметри, що збільшують значення R1), використовується обладнання, в якому тепло від газів передається через стінку. Відомо, що теплопередача через стінку малоефективна і тому гази після теплоутилізаційного обладнання мають високу температуру. Тому у формулі енергоефективності доцільно було б враховувати коефіцієнт використання енергії спалювання відходів на промислові технології, наприклад, у виробництві будівельних матеріалів. Крім того, великі підприємства мають більший рейтинг R1 зі спалювання сміття (потужністю більше 100 000 т/рік).

Список літератури:

1. Kong W. Implementation of incineration for efficient waste reduction. International Conference on Advances in Environment Research. 2015. Vol. 87. P. 77–80. DOI: 10.7763/IPCBE. 2015. V. 87. P. 14.
2. Young G. Municipal solid waste to energy conversion processes: Economic, technical, and renewable comparisons. New Jersey, United States: John Wiley & Sons, Inc., 2010. 396 p.
3. Waste Framework Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council on waste. Official Journal of the European Union, November, 22, 2008. P. L312/3–30.
4. Chatzopoulou M., Cheeseman C., James P., Velis C. Critical evaluation of the R1 formula for energy from waste plants classification: is the target hit? Conference: 4th International Conference, Hellenic Solid Waste Management Association (HSWMA), At Athens, Greece. 2012. Vol. 1. P. 1–14. DOI: 10.13140/RG.2.1.4235.4649.
5. Francesco D., Stefano Contini, Gianni Bidini, Antonio Boncompagni, Marzio Lasagni, Federico Sisani. Energetic efficiency of an existing waste to energy power plant. Energy Procedia. 2016. № 101. P. 1175–1182. DOI: 10.1016/j.egypro.2016.11.159.
6. Gohlke O. Efficiency of energy recovery from municipal solid waste and the resultant effect on the greenhouse gas balance. Waste Management & Research. 2009. № 27. P. 894–906. DOI: 10.1177/0734242X09349857.
7. Vakalis S., Moustakas K., Loizidou M., Assessing the 3T method as a replacement to R1 formula for measuring the efficiency of waste-to-energy plants (Greece). 5th International Conference on Sustainable Solid Waste Management 21–24 June 2017 Athens, Greece. URL: <http://athens2017.uest.gr/>.
8. Guidelines on the interpretation of the R1 energy efficiency formula for incineration facilities dedicated to the processing of Municipal Solid Waste according to Annex II of Directive 2008/98/EC on waste (not legally binding version). Official Journal of the European Union. 2011. 33 p.
9. Ying-Chu Chen, Chung-Ting. Wang Municipal solid waste (MSW) incineration's potential contribution to electricity production and economic revenue in Taiwan. Journal of Taiwan Energy. 2017. Vol. 4. № 1. P. 93–106.
10. Lei Zhao, Apostolos Giannis, Wan-Yee Lam, Sheng-Xuan Lin, Ke Yin, Guo-An Yuan, Jing-Yuan Wang. Characterization of Singapore RDF resources and analysis of their heating value. Sustainable Environment Research. 2016. Vol. 26. Is.1. P. 51–54. DOI: 10.1016/j.serj.2015.09.003.

**ЕНЕРГОЕФФЕКТИВНОСТЬ МУСОРОСЖИГАЮЩИХ УСТАНОВОК
ПО РЕКОМЕНДАЦИЯМ ДИРЕКТИВЫ ЕВРОПЕЙСКОГО СОЮЗА**

Утилизация твердых бытовых отходов является проблемой для большинства украинских муниципалитетов. Согласно современным мировым тенденциям обращения с отходами, сжигание отходов с получением энергии позволяет снизить вредное воздействие на окружающую среду. В статье рассматривается возможность проектирования мусоросжигательных заводов в Украине в соответствии с директивой 2008/98/ЕС. Приводится формула расчета энергетической эффективности для мусоросжигательных установок, так называемая «формула R1», реализующая термин «отходы в энергию». Основными параметрами, увеличивающими значение R1, является производство тепловой и электрической энергии после сжигания отходов.

Ключевые слова: бытовые отходы, термическое уничтожение, энергетическая эффективность, теплотворная способность, энергия из отходов.

**ENERGY EFFICIENCY OF WASTE INCINERATION ON THE RECOMMENDATION
OF THE EUROPEAN UNION DIRECTIVE**

Utilization of solid household waste is a problem for most Ukrainian municipalities. According to modern world trends of waste management, incineration of waste with energy generation allows to reduce the harmful impact on the environment. The possibility of designing incineration plants in Ukraine is considered in accordance with Directive 2008/98/EC. A formula is given for calculating the energy efficiency for incineration plants, the so-called “formula R1”, which realizes the term “waste into energy”. The main parameters that increase the value of R1, is the production of thermal and electrical energy after the incineration of waste.

Key words: household waste, incineration, energy efficiency, heating value, energy from waste.

РОЗРОБКА КОРИСНИХ КОПАЛИН

УДК 622.24.058

Василишин В.Я.

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

МЕТОД ДЛЯ РОЗРАХУНКУ НОРМАЛЬНИХ НАПРУЖЕНЬ ВТОМНОЇ ДОВГОВІЧНОСТІ НАСОСНО-КОМПРЕСОРНИХ ТРУБ ЗА УМОВИ ЇХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ У КРИВОЛІНІЙНИХ ДІЛЯНКАХ СВЕРДЛОВИН

Встановлено, що, окрім змінної осьової сили, у криволінійній ділянці свердловини колона насосно-компресорних труб може піддаватися впливу як статичних, так і циклічних згинальних моментів. Останні виникають через додаткове зусилля розтягу від ваги стовпа рідини, що діє на прийомний клапан під час руху точки підвіски штанг вниз. Вказані згинальні моменти можуть бути причиною втомного руйнування насосно-компресорної колони. Розроблений метод можна використовувати для розрахунку нормальних напружень і прогнозування втомної довговічності насосно-компресорних труб за умови їх експлуатації у криволінійних ділянках свердловин.

Ключові слова: насосно-компресорна труба, напружено-деформований стан, втомна довговічність, криволінійна ділянка свердловини.

Постановка проблеми. Аварії з колонами насосно-компресорних труб (далі – НКТ) під час їх експлуатації є доволі поширеним явищем. Так, наприклад, дані по прикарпатському регіону свідчать, що кількість свердловин, на яких було зафіксовано порушення роботи НКТ, у нафтогазовидобувного управління (далі – НГВУ) «Долинанафтогаз» становить 45%, НГВУ «Бориславнафтогаз» – 28%, НГВУ «Надвірнанафтогаз» – 27%. Спостерігається такий характер відмов насосно-компресорних колон: втрата герметичності різьбових з'єднань – 80,2%; наявність отворів у тілі труб – 2,6%; тріщини в тілі труб – 6,2%; інші – 11%

Автор роботи [1] зазначає, що найчастіше аварійність НКТ спричиняють різьбові з'єднання, зокрема: руйнування (34%); втрата герметичності (12%); з'єднання не згвинчується – критичне значення натягу і геометричних параметрів профілю (43%); з'єднання не розгвинчується – «прихоплення» різьби (11%). Тут же наводиться й аналіз порушень роботи ВАТ «Укрнафта», який показав, що відмови різьбового з'єднання НКТ серед усіх інших видів склали: у 2008 р. – 32,8%, у 2009 р. – 34,2%, у 2010 р. – 32,2%.

У статті [2] відзначається, що труби та їх різьбові з'єднання за нафтовидобутку в ускладнених умовах піддаються не тільки інтенсивному коро-

зійному впливу агресивного середовища, але й значним знакозмінним механічним навантаженням, що призводить до активного руйнування різьби труб. Так, за даними Американського нафтового інституту (API), а також результатами проведеного російськими спеціалістами кваліметричного аналізу експлуатаційної надійності НКТ, кількість відмов таких труб із причин руйнування різьбових з'єднань складає 50–55%.

Причин, які зумовлюють такий стан аварійності, більше ніж достатньо, проте основними є вплив агресивного середовища та напружено-деформований стан. Зокрема, згідно з дослідженнями А.Н. Адоніна, за глибинонасосного способу видобування вуглеводневої сировини колона НКТ навантажена: силою розтягу від власної ваги та частини ваги рідини в трубах, яка не передається на штанги під час їх ходу вгору; додатковою силою розтягу від ваги стовпа рідини, що діє на прийомний клапан під час руху точки підвіски штанг вниз; силами тертя, які виникають внаслідок зворотно-поступального руху колони насосних штанг. Додатково в поперечному перерізі НКТ можуть виникати згинальні моменти, серед причин виникнення яких є криволінійні ділянки свердловин і коливання [3].

Сукупна дія вищезазначених силових факторів може призводити до значних осьових і радіальних деформацій насосно-компресорної колони, які, до того ж, є змінними у часі.

Виклад основного матеріалу дослідження. Як відомо, зовнішній діаметр НКТ менший від внутрішнього діаметру обсадної колони. Це робить можливим поперечні відхилення пружної осі НКТ відносно осі свердловини, що, в свою чергу, спричинятиме виникнення нормальних напружень від згину. Враховуючи специфіку навантаження насосно-компресорних колон, ці напруження можуть мати циклічний характер та ініціювати втомні процеси в матеріалі НКТ. На рис. 1 штрих-пунктирною лінією схематично зображено три можливі положення осі насосно-компресорної колони в обсадженому стовбурі свердловини. Суцільною лінією позначено межі переміщення пружної осі НКТ, зумовлені обсадними трубами.

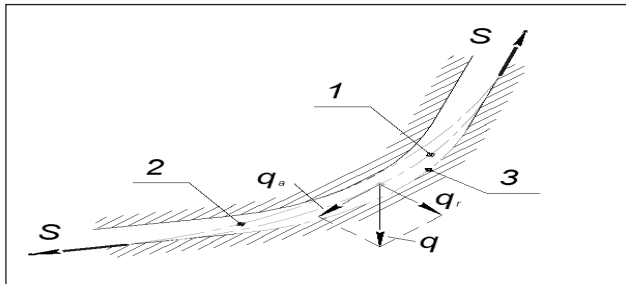


Рис. 1. Можливі положення осі НКТ в обсадженому стовбурі свердловини

Форма пружної осі, що відповідає кожному з положень, зображених на рис. 1, передусім залежить від таких чинників: радіального й осьового (S_1) складника власної ваги частини колони НКТ, яка перебуває у криволінійній ділянці свердловини; сили розтягу (S_2) від колони НКТ, що знаходиться нижче за розглядувану криволінійної ділянки; додаткової сили розтягу (S_3) від стовпа рідини, що перекачується.

Враховуючи специфіку роботи глибинонасосного устаткування [6] варто відзначити, що у нижньому положенні підвіски штанг сила S_3 набуває певного значення, про величину якого буде сказано пізніше. За верхнього ж положення підвіски штанг сила S_3 рівна нулю [6].

Позначимо рівнодійну сил S_1 , S_2 , S_3 через S . У загальному випадку величина S може набувати двох значень, які відповідають нижньому та верхньому положенням підвіски штанг:

$$S = S_{\max} = S_1 + S_2 + S_3$$

або

$$S = S_{\min} = S_1 + S_2$$

Розглянемо на прикладі методику розрахунку для визначення умов, за яких колона НКТ займатиме те чи інше з положень, що зображені на рис. 1.

Характеристики НКТ, згідно із ГОСТ 633–80: зовнішній діаметр $d = 89$ мм; товщина стінки $h = 6,5$ мм; вага одиниці довжини труби $q = 129,4$ Н/м.

Використано обсадну колону із труб зовнішнім діаметром $D = 140$ мм та товщиною стінки $h_1 = 6,2$ мм (згідно із ГОСТ 632–80).

Інклінометричні показники криволінійної ділянки свердловини: довжина вздовж осі свердловини $L = 120$ м; зенітний кут на початку $\alpha_1 = 0^\circ$; зенітний кут на закінченні $\alpha_2 = 12^\circ$; інтенсивність викривлення по зенітному куту $i = 1^\circ / 10$ м; радіус кривизни $R = 191$ м.

Для аналізу напружено-деформованого стану скористаємося таким диференціальним рівнянням пружної осі балки та його розв'язком відповідно:

$$EI y^{IV}(x) - S y''(x) = -q_r, \quad (1)$$

$$y(x) = C_2 \frac{EI}{S} \exp\left(\sqrt{\frac{S}{EI}} x\right) + C_1 \frac{EI}{S} \exp\left(-\sqrt{\frac{S}{EI}} x\right) + \frac{q_r x^2}{2S} + C_3 x + C_4, \quad (2)$$

де q_r – радіальна складова частина власної ваги НКТ, яка дорівнює:

$$q_r = q \sin\left(\alpha_1 + \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{2}\right).$$

Для визначення невідомих констант C_1 , C_2 , C_3 , C_4 скористаємося системою крайових умов:

$$\begin{cases} y(0) = 0, \\ y''(0) = 0, \\ y(l) = 0, \\ y''(l) = 0. \end{cases} \quad (3)$$

У цьому разі також невідомими є сила розтягу S та довжина балки l . Їх визначимо, виходячи із виконання умов (4) та (5):

$$y'(0) = \psi \quad (4)$$

та

$$v_1 < y\left(\frac{l}{2}\right) < v_2. \quad (5)$$

Тут, згідно із роботою [7],

$$\psi = \frac{L}{2R}, \quad (6)$$

$$v_1 = \frac{R}{\cos \psi} - \frac{tg \psi}{2} - R + (D - 2h_1 - d) \quad (7),$$

$$v_2 = \frac{R}{\cos \psi} - \frac{l tg \psi}{2} - R \quad (8)$$

Визначення C_1 , C_2 , C_3 , C_4 , S та l за рівностями (4), (6), (7), (8) та нерівністю (5) зручно проводити,

використовуючи циклічну процедуру, наприклад, у *Waterloo Maple*. Використавши вихідні дані, отримаємо, що $S_{(1)} = 7\,700$ Н. Осьова сила розтягу від власної ваги, що визначена за формулою

$$S_1 = q_a l = q \cos\left(\alpha_1 + \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{2}\right) l, \quad (9),$$

становить $S_1 = 8\,487$ Н. Якщо замість нерівності (5) використати нерівність

$$y\left(\frac{l}{2}\right) < v_1, \quad (10),$$

то отримаємо мінімальне значення осьової сили, за якої колона НКТ займе положення №2 (див. рис. 1). У цьому разі маємо $S_2 = 7\,800$ Н. Якщо ж замість нерівності (6) застосувати нерівність

$$v_2 < y\left(\frac{l}{2}\right), \quad (11),$$

то отримаємо максимальне значення сили розтягу, за якої вісь НКТ займе положення № 3 (див. рис. 1): $S_{(3)} = 7\,600$ Н.

Очевидно, зміна положення осі НКТ відносно осі свердловини відповідно до положення штоку глибинного насоса відбуватиметься у разі виконання системи нерівностей:

$$\begin{cases} S_{\max} \geq S_{(2)}, \\ S_{\min} \leq S_{(3)}. \end{cases} \quad (12).$$

Перша нерівність системи (12) виконується, а друга – ні. І це навіть без врахування сил S_2 та $S_{(3)}$. Отже, можемо зробити висновок: за цих умов колона труб НКТ контактуватиме з верхньою частиною криволінійного стовбура (положення № 2 на рис. 1). Періодична зміна осьової сили, зумовлена рухом штоку глибинного насоса, не призводитиме до появи змінних напружень згину у поперечному перерізі НКТ.

У свою чергу, нормальні напруження згину для кожного з положень пружної осі (див. рис. 1) можемо визначити за такими формулами (величини для цього прикладу подано в дужках):

положення 1

$$\sigma_{\max} = EI \frac{y(0, Sl)}{W}, \quad (\sigma_{\max} = 20,4 \text{ МПа});$$

положення 2

$$\sigma_{\max} = \frac{E d}{2R - (D - 2h_1)}, \quad (\sigma_{\max} = 16,3 \text{ МПа});$$

положення 3

$$\sigma_{\max} = \frac{E d}{2R + (D - 2h_1)}, \quad (\sigma_{\max} = 16,3 \text{ МПа}).$$

Розглянемо наступний приклад. Він повністю аналогічний до попереднього за винятком того, що зенітний кут на початку $\alpha_1 = 30^\circ$, а зенітний кут на закінченні $\alpha_1 = 42^\circ$. Величини сил розтягу відповідно рівні $S_{(1)} = 43\,500$ Н, $S_{(2)} = 44\,000$ Н, $S_{(3)} = 43\,000$ Н.

Згідно із формулою (9), $S_1 = 6\,546$ Н. Як бачимо, виконання системи (12) можливе, якщо

$$\begin{cases} S_2 + S_3 \geq S_{(2)} - S_1, \\ S_2 \leq S_{(3)} - S_1. \end{cases}$$

або, підставивши чисельні значення,

$$\begin{cases} S_2 + S_3 \geq 37454 \text{ Н}, \\ S_2 \leq 36454 \text{ Н}. \end{cases} \quad (13).$$

Отже, за цих умов періодична зміна осьової сили, зумовлена рухом штоку глибинного насоса, призводитиме до появи змінних напружень згину у поперечному перерізі НКТ, якщо сили S_2 та S_3 задовольнятимуть систему (13).

Величини нормальних напружень згину можемо визначити за аналогією до попереднього прикладу.

Розглянемо застосування методики з використанням даних зведеної інклінограми свердловини № 93 Довбушансько-Бистрицького родовища. Починаючи від устя до вибою, свердловина складається з таких ділянок:

1) прямолінійна; довжина $L_1 = 206,5$ м; зенітний кут $\alpha_1 = 0^\circ$;

2) криволінійна; довжина $L_2 = 25$ м; зенітний кут на початку $\alpha_{21} = 0^\circ$; зенітний кут на закінченні $\alpha_{22} = 4,5^\circ$; інтенсивність викривлення $1,8^\circ / 10$ м;

3) прямолінійна; довжина $L_3 = 774,2$ м; зенітний кут $\alpha_3 = 4,50$;

4) криволінійна; довжина $L_4 = 75$ м; зенітний кут на початку $\alpha_{41} = -4,5^\circ$; зенітний кут на закінченні $\alpha_{42} = 7,6^\circ$; інтенсивність викривлення $1,6^\circ / 10$ м;

5) прямолінійна; довжина $L_5 = 230,3$ м; зенітний кут $\alpha_5 = 7,6^\circ$;

6) прямолінійна; довжина $L_6 = 1\,603$ м; зенітний кут $\alpha_6 = 4,6^\circ$.

Із розрахунку за формулами (1) – (11) отримаємо: $S_{(1)} = 20$ Н, $S_{(2)} = 40$ Н, $S_{(3)} = 0$ та $S_1 = 4\,963$ Н. Величину S_2 визначимо за методикою, що наведена в роботі [8]. Відтак

$$S_2 = L_3 q g \cos \alpha_3 + L_5 q g \cos \alpha_5 + L_6 q g \cos \alpha_6,$$

або, із підстановкою числових значень, $S_2 = 336\,067$ Н.

Для розрахунку сили S_3 скористаємося важливою властивістю теоретичної штангової динамограми. Як зазначено в роботі [6], відстань між відрізками AG та BB вздовж осі ординат чисельно рівна вазі стовпа перекачуваної рідини, яка діє на прийомний клапан. Застосувавши це твердження для реальної динамограми, матимемо $S_3 = 14\,091$ Н.

У разі підставлення чисельних даних у систему (12) не виконується її друге рівняння. Відтак НКТ не зазнаватимуть змінних навантажень згину. Нормальні напруження у поперечному перерізі НКТ:

Результати експериментальних досліджень втомної міцності різьбового з'єднання НКТ

№ п/п	Відцентрова маса m , кг	Момент згину $M_{зг}$, Н·м	Кількість циклів навантаження, за якого відбулося руйнування, млн циклів	Напруження згину, за якого відбулося руйнування $\sigma_{зг}$, МПа	$lg N$	$lg \sigma$
1	10,0	1 095,5	8,4825	314,4	6,928	2,497
2	10,5	1 150,296	3,8534	330,135	6,581	2,519
3	11,5	1 259,848	1,4567	361,576	6,162	2,558
4	12,0	1 314,624	0,9534	377,297	5,974	2,576
5	12,5	1 369,400	0,4123	393,017	5,612	2,594
6	12,7	1 387,121	0,3595	399,3	5,556	2,601

$$\tilde{A}_{зг} = \tilde{A}_{max} = \frac{Ed}{2R - (D - 2h_1)} = 24,4 \text{ МПа} - \text{згину};$$

$$\tilde{A}_{роз min} = \frac{S_{min}}{A} = 199,5 \text{ МПа} - \text{розтягу мінімальне};$$

$$\tilde{A}_{роз max} = \frac{S_{max}}{A} = 207,8 \text{ МПа} - \text{розтягу максимальне}.$$

Для другої криволінійної ділянки розрахунковий алгоритм повністю аналогічний до попереднього випадку. Згідно із формулами (1) – (11), маємо: $S_{(1)} = 1\,000$ Н; $S_{(2)} = 1\,100$ Н; $S_{(3)} = 900$ Н. Сила розтягу від власної ваги (згідно із формулою (9)) становить $S_1 = 6\,129$ Н. Значення S_2 дорівнює:

$$S_2 = L_5 q g \cos \alpha_5 + L_6 q g \cos \alpha_6.$$

Після підстановки чисельних даних маємо $S_2 = 236\,226$ Н. Величина S_3 така ж, як і у попередньому прикладі. Оскільки у системі (12) знову ж таки не виконується друга нерівність, у цій криволінійній ділянці колона НКТ не зазнаватиме змінних навантажень згину. Отримані значення напружень рівні $\sigma_{зг} = 26,3$ МПа, $\sigma_{роз min} = 140,2$ МПа, $\sigma_{роз max} = 148,6$ МПа.

Як бачимо із вищевикладеного матеріалу, під час експлуатації колона НКТ піддається дії змінного навантаження як в осьовому, так і, за певних умов, радіальному напрямку. Розрахунок показує, що у криволінійних ділянках свердловин, які знаходяться ближче до устя, якщо зенітні кути не набувають значних величин, домінуючим навантаженням є осьовий розтяг зі змінною амплітудою та суттєвим коефіцієнтом асиметрії циклу, який, до-речі, зменшується у напрямку до вибою. Так, для проаналізованої у прикладі розрахунку свердловини коефіцієнт асиметрії для першої криволінійної ділянки рівний $R = 0,96$, а для другої – $R = 0,94$.

Для криволінійних ділянок, які знаходяться ближче до вибою, величина статичної складової частини осьового розтягу зменшується порівняно зі змінною. Додатково на таких ділянках можуть виникати змінні напруження згину. Розрахунок показав, що для розглядуваної свердловини

(№ 93 Довбушансько-Бистрицького родовища) умови експлуатації НКТ не викликать змінних напружень згину в жодній із двох криволінійних ділянок. Проте, якщо б, наприклад, розглянути умовну криволінійну ділянку, для якої б виконувалася система умов (13), то величини напружень були б такими: $\sigma_{зг} = 20,3$ МПа, $\sigma_{роз min} = 24,7$ МПа, $\sigma_{роз max} = 30,6$ МПа.

У цьому разі $R = 0,81$, а величина напружень від згину співрозмірна з величиною напружень від розтягу.

Однак для забезпечення надійної роботи НКТ, окрім інформації про їх напружено-деформований стан, слід також мати і характеристики втомної міцності. Для визначення останніх нами було проведено лабораторні дослідження довговічності натурних зразків різьбових з'єднань НКТ умовним діаметром 89 мм (група міцності сталі Л).

Експеримент проводився на лабораторній установці «УКІ-6І» [9]. Напруження згину в небезпечному перерізі різьбового з'єднання НКТ визначали за формулою:

$$\sigma_{зг} = \frac{M_{зг} R_{max}}{I}, \quad (14)$$

де $M_{зг}$ – момент згину; R_{max} – відстань від вагового центру перерізу до точки, в якій визначається напруження; I – момент інерції поперечного перерізу, в якому відбувається руйнування.

Момент згину розраховуємо так:

$$M_{зг} = P l, \quad (15)$$

де l – плече дії сили для проведених експериментів;

P – відцентрова сила, яка в свою чергу рівна

$$P = m \omega^2 r,$$

де m – відцентрова маса; ω – кутова швидкість навантажувальної головки; r – радіус встановлення відцентрової маси.

Результати вимірювань і розрахунків за формулами (14), (15) подано у табл. 1.

Враховуючи те, що зразки для втомних досліджень різьбових з'єднань НКТ – це відрізки натурних НКТ, які експлуатувалися в реальних умовах, де піддавалися дії корозійного середовища, а в процесі випробувань у різьбових з'єднаннях протікають процеси фретінг-корозії, то характер їх руйнування відповідає корозійно-втомному механізму. Як наслідок, на поверхні руйнування спостерігали зародження кількох корозійно-втомних тріщин, що підтверджує природу руйнування досліджуваного різьбового з'єднання НКТ за корозійно-втомним механізмом.

Відтак залежність границі втоми від кількості циклів напруження запропоновано у вигляді степеневого поліному:

$$\sigma = -5,025\lambda^5 + 75,916\lambda^4 - 347,761\lambda^3 + 603,825\lambda^2 - 439,433\lambda + 486,466 \quad (16)$$

або, в координатах $\lg N - \lg \sigma$,

$$\lg \sigma = 403,057 - 10,4518 \cdot \lg N, \quad (17),$$

де $\lambda = N \cdot 10^{-6}$.

Рівняння (17) називається двопараметричним рівнянням кривої втоми і в загальному вигляді записується таким чином:

$$\lg(\sigma_{an}) = b \lg N + a,$$

де a і b – параметри рівняння, які визначаються за даними корозійно-втомних випробувань;

σ_{an} – зведені до симетричного циклу амплітудні напруження асиметричного циклу; N – довговічність – кількість циклів до руйнування.

Отже, $a = 403,057$ та $b = -10,4518$ і є шуканими характеристиками втомної міцності різьбових з'єднань НКТ діаметром 89 мм і можуть бути використані для прогнозування їх довговічності в експлуатаційних умовах.

Висновки. Із проведених теоретичних досліджень напружено-деформованого стану насосно-компресорної колони встановлено, що напруження від згину в криволінійному стовбурі свердловини мають як статичний так і, за певних умов, циклічний характер. Останні виникають через додаткове зусилля розтягу від ваги стовпа рідини, що діє на прийомний клапан під час руху точки підвіски штанг униз і можуть ініціювати втомні процеси в матеріалі НКТ. Аналітичний розрахунок показав, що за інших незмінних умов імовірність періодичної деформації колони НКТ більша у криволінійних ділянках зі значними величинами зенітних кутів на початку та на закінченні. Також, за результатами лабораторних експериментів, отримані параметри кривої втоми, які можуть бути використані для прогнозування залишкового ресурсу НКТ діаметром 89 мм.

Список літератури:

1. Василюшин В.Я. Підвищення працездатності різьбових з'єднань труб нафтового сортаменту: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.05.12; Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, 2013. 20 с.
2. Проскуркин Е., Арустамов С., Евдокимов В. Новая жизнь треугольной резьбы. Преимущества использования диффузионных цинковых покрытий для соединения труб нефтяного сортамента. Национальная металлургия. 2007. № 2. С. 24–30.
3. Савула С.Ф., Колодій В.Т., Харченко Є.В. Оцінка впливу коливань колони насосно-компресорних труб на умови роботи різьбових з'єднань. Науковий вісник національного технічного університету нафти і газу. 2004. № 2 (8). С. 116–125.
4. Атнагулов А.Р. Прогнозирование технического состояния УЭЦН при эксплуатации с оценкой динамических нагрузок: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.13. Уфа, 2008. 24 с.
5. Ишмурзин А.А., Хоанг Тхинь Нян Методика расчета крутящих моментов в трубах и штангах, возникающих при спуске в скважину с пространственным искривлением ствола. Нефтегазовое дело. 2006. № 1.
6. Ивановский В.М., Дарищев В.И., Сабиров А.А. Скважинные насосные установки для добычи нефти. М.: ГУП Изд-во «Нефть и Газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2002. 824 с.
7. Рачкевич Р.В., Артим В.І., Козлов А.А. Визначення положення бурильної колони у криволінійному стовбурі свердловини Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. 2007. № 4 (25). С. 88–92.
8. Рачкевич Р.В. Напружено-деформований стан стисненої бурильної колони у горизонтальному стовбурі свердловини. Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. 2012. № 3 (44). С. 70–77.
9. Рачкевич Р.В. Прогнозування довговічності бурильної колони в ускладнених умовах буріння свердловини: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.05.12; Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, 2013. 20 с.

МЕТОД ДЛЯ РАСЧЕТА НОРМАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ НАСОСНО-КОМПРЕССОРНЫХ ТРУБ ПРИ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ В КРИВОЛИНЕЙНЫХ УЧАСТКАХ СКВАЖИН

Установлено, что кроме переменной осевой силы, в криволинейном участке скважины колонна насосно-компрессорных труб может подвергаться воздействию как статических, так и циклических изгибающих моментов. Последние возникают из-за дополнительных усилий растяжения от веса столба жидкости, действующего на приемный клапан при движении точки подвески штанг вниз. Указанные изгибающие моменты могут быть причиной усталостного разрушения насосно-компрессорной колонны. Разработанный метод можно использовать для расчета нормальных напряжений и прогнозирования усталостной долговечности насосно-компрессорных труб при их эксплуатации в криволинейных участках скважин.

Ключевые слова: насосно-компрессорная труба, напряженно-деформированное состояние, усталостная долговечность, криволинейный участок скважины.

METHOD FOR CALCULATION OF NORMAL STRESSES OF FATIGUE LIFE OF PUMP-COMPRESSOR PIPES DURING THEIR OPERATION IN CURVILINEAR SECTIONS OF WELLS

It was established that in addition to the variable axial forces on a curved section of the well column tubing may be exposed to both static and cyclic bending moments. Last arise from additional tensile force of the weight of the liquid column acting on the receiving valve by driving down the point of suspension rods. These bending moments can cause fatigue tubing. The method can be used to calculate the normal stresses and predicting fatigue durability tubing during their operation in curved sections of wells.

Key words: tubing, mode of deformation, fatigue durability, curvilinear plot hole.

УДК 622.012:658.5:622.68

Жуков С.О.

ДВНЗ «Криворізький національний університет»

Азарян В.А.

ДВНЗ «Криворізький національний університет»

РОЗВИТОК ТЕОРІЇ УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ РУДОПОТОКІВ ЗАЛІЗОРУДНИХ ГІРНИЧО-ЗБАГАЧУВАЛЬНИХ КОМБІНАТІВ

У статті проаналізовано технологічні та фінансові втрати залізорудних гірничо-збагачувальних комбінатів від коливань якості фінальних рудних вантажопотоків, які є вхідною сировиною рудозбагачувальних фабрик. Авторами запропоновано концепцію генералізації, суть якої полягає в об'єднанні всіх засобів контролю, сортування і шихтовки руд в єдину, технологічно домінуючу в масштабі не тільки окремого кар'єра, але і всього гірничо-збагачувального комбінату, комп'ютеризовану систему, підпорядковану загальній цільовій алгоритмізації. Обґрунтована концепція генералізації технології управління якістю інтегрованих рудопотоків залізорудних гірничо-збагачувальних комбінатів. Набула подальшого розвитку теорія управління якістю в умовах відкритих гірничих робіт. Також у статті розглянуто проблему зупинення виробничих потужностей збагачувального комплексу через зниження видобутку залізорудними кар'єрами, розроблено критерій та алгоритм оцінки доцільності виведення з експлуатації всієї рудозбагачувальної фабрики або її частини (секції) та перенаправлення фінального рудопотоку на інший гірничо-збагачувальний комбінат.

Ключові слова: гірничо-збагачувальний комбінат, рудозбагачувальна фабрика, кар'єр, управління якістю рудопотоку, вміст корисного компоненту.

Постановка проблеми. Проблема управління якістю рудопотоків актуалізувалася наприкінці ХХ ст., коли вміст корисного компонента в руді почав стійко знижуватися після відпрацювання найбільш багатих ділянок залізорудних родовищ.

Показники якості продукції гірничо-збагачувального комбінату (далі – ГЗК) зумовлюють її відпускну ціну і впливають на техніко-економічні результати роботи підприємства. У свою чергу, якість кінцевої продукції всього комбінату безпосередньо залежить від характеристик вхідної руди, що надходить на рудозбагачувальну фабрику (далі – РЗФ). Таким чином, формування фінального рудопотоку має вплив на технологічні і фінансові показники ГЗК.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Технологічна ефективність стабілізації якісних показників залізорудної сировини доведена дослідженнями багатьох відомих вчених, а також багаторічним практичним досвідом роботи ГЗК [1–3].

Постановка завдання. Рішення цієї проблеми вимагає виконання комплексу заходів з управління якістю руди у процесі видобутку та переробки. Управління якістю неможливе без

оперативного контролю на всіх етапах і у всіх технологічних процесах гірничого виробництва. До завдань оперативного контролю належить не тільки вибір засобів і систем контролю якості, а й, не менш важливо, визначення оптимального періоду опробування забоїв [4].

Необхідність суворої і стійкої відповідності сформованого рудопотоку заданим якісним показникам зумовлена тим, що оптимальні режими збагачення можуть бути забезпечені тільки за умови жорстко обмежених відхилень вмісту корисного компонента в фінальному рудопотоці, а не в кожному окремо, що є характерним для сучасних ГЗК, які розробляють в одному (ПрАТ «ІнГЗК», ПАТ «Південний ГЗК», ПАТ «ПГЗК») або декількох кар'єрах поклади різнорідних руд (Гірничий департамент ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», ПрАТ «ЦГЗК», ПрАТ «Північний ГЗК»).

Встановлено, що, внаслідок амплітудних і тимчасових коливань сировинної якості рудо потоків, ГЗК Кривбасу щорічно втрачають близько 990 тис. тонн концентрату. Фінансові втрати від цього складають 64,4 млн дол. США в цінах квітня 2016 р., або 1,650 млн грн.

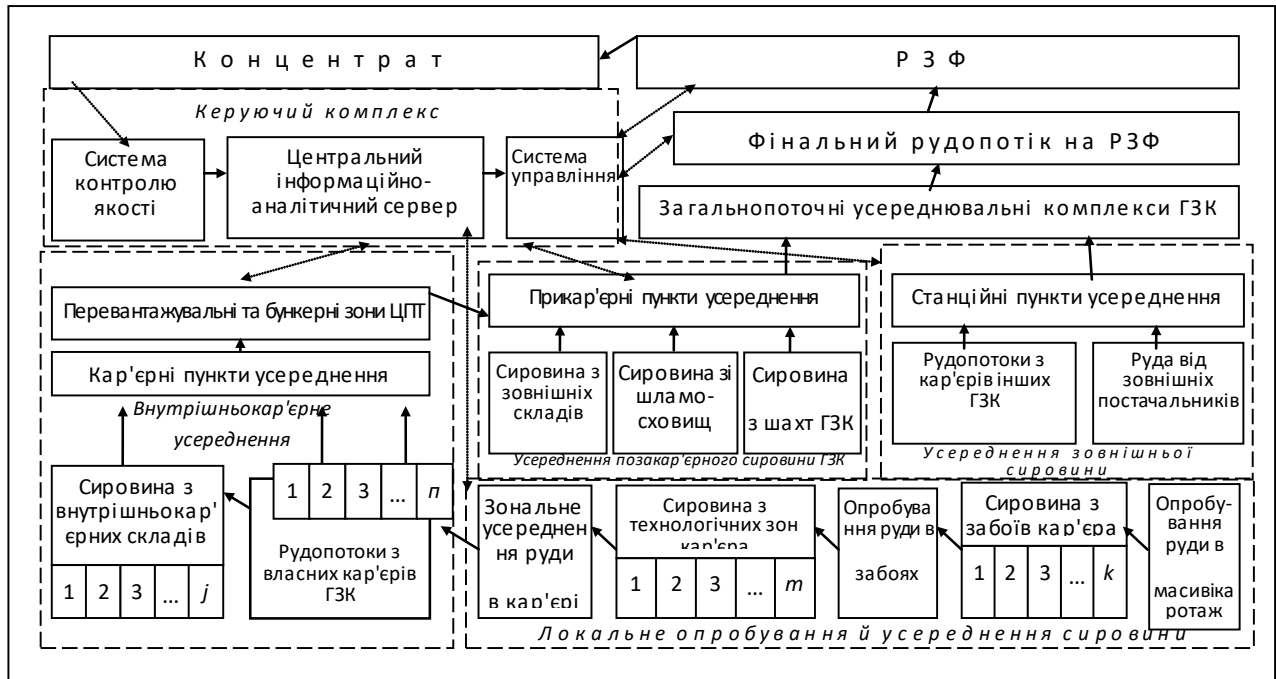


Рис. 1. Концептуальна схема генералізації в масштабах ГЗК технології управління інтегрованими рудними вантажопотоками

У зв'язку з цим забезпечення зумовленого рівня якості і стабілізація амплітуди його коливань у фінальному рудопотоці за важливістю, складністю і масштабами є актуальною науковою проблемою, яка вимагає створення відповідної науково-методичної бази та подальшого розвитку теорії управління якістю в умовах відкритих гірничих робіт.

Виклад основного матеріалу дослідження. Ідея, покладена в основу представлених досліджень, полягає в генералізації управління якістю фінального рудопотоку шляхом об'єднання всіх засобів контролю, сортування і шихтовки руд в єдину, технологічно домінуючу в масштабі не тільки окремого кар'єра, але і всього ГЗК, комп'ютеризовану систему, підпорядковану загальній цільовій алгоритмізації.

Реалізація цієї ідеї вимагає розробки і теоретичного обґрунтування відповідної технології управління якістю фінального рудопотоку: від геологічного картування і технологічного зонування рудних покладів до керуючих сигналів зворотного зв'язку аналізаторів вихідного потоку збагачувальної фабрики, що включає в себе всю організаційно-керуючу систему ГЗК з відповідними технічними й інформаційними засобами.

У ході виконаних досліджень було розроблено і теоретично обґрунтовано локальні і загальнокар'єрні технології управління якістю

рудних вантажопотоків, включаючи нові технічні засоби, які було опубліковано раніше [5–8].

Запропонована нова концепція генералізації управління інтегрованими рудними вантажопотоками має ешелоновану по вертикалі ієрархію та згруповану за просторово-технологічними зонами і вимогами якості сировини багаторівневу структуру, схематично представлену на рис. 1.

Геологічне картування передбачає оконтурювання в масивах кар'єрного поля руд із близьким вмістом корисного компонента, а технологічне районування – виділення ділянок, придатних для розробки за однаковою технологією, оскільки не завжди сортності за вмістом заліза і за збагачуваністю руд збігаються.

Тому для вирішення таких завдань раніше було розроблено метод геологічної додаткової розвідки – радіометричного каротажу вибухових свердловин [9], а також технологія структурно-кваліметричного зонування районів кар'єру, об'єднаних за технологічними ознаками. Всі дані, що отримують після додаткової розвідки, вносять до центрального сервера системи управління якістю фінальних рудопотоків залізородних ГЗК, які разом з інформацією про сировинну якість з інших етапів виробництва створюють загальну базу даних.

Аналіз проектів подальшого розвитку залізородних ГЗК України свідчить, що більшість із них

пропрацюють із проектною продуктивністю ще 15–20 років, після чого вона почне планомірно знижуватися в міру доопрацювання продуктивних покладів руд або граничних за проектною глибиною горизонтів кар'єрів. Неминуче виникає проблема відповідного зниження завантаження збагачувальних фабрик пропорційно падінню видобутку руд.

Техніко-економічні розрахунки свідчать, що послідовне виведення збагачувальних секцій РЗФ ГЗК є неминучою реальністю. І тут виникає надзвичайно серйозна, майже не досліджена нині проблема, суть якої полягає в тому, що збагачувальний процес, хоч і реалізується сукупністю збагачувальних секцій, які з погляду управління є дискретними технологічними одиницями, відбувається у РЗФ – системі, яка є єдиним середовищем, що включає в себе не тільки підсистеми – збагачувальні секції, але й загальносистемні складові частини (будівлі та споруди, спільні дробильно-сортувальні й інші технологічні комплекси, єдині транспортні та складські системи, енергетичні й інженерні мережі, загальні основні фонди та ресурси, наскрізну інфраструктуру, систему забезпечення, управління, логістики тощо). Тому РЗФ є утворенням суцільно інтегрованим, надзвичайно складним функціонально та громіздким структурно, а головне – цілеспрямовано розрахованим виключно на повний масштаб об'єкта, як проектно, так і програмно. Саме тому РЗФ як система не тільки не має адаптаційної гнучкості щодо масштабної варіабельності активної чисельності її дискретних одиниць – збагачувальних секцій, а навпаки – вона проектно і програмно максимально захищена від будь-яких відхилень від проектних показників, внаслідок чого, скорочуючи кількість працюючих секцій, ГЗК не має можливості пропорційно скорочувати витрати на утримання РЗФ, а тому несе їх у повному масштабі.

Зважаючи на зазначене, було досліджено почергове закриття збагачувальних фабрик на ГЗК, продуктивність яких знижується в групі комбінатів до критичного значення, що визначається розробленим критерієм, суть якого полягає в співвідношенні витрат на утримання власної РЗФ ГЗК і прибутку від реалізації збагаченої продукції. Після зниження рентабельності збагачення руд до мінімального рівня (з урахуванням необхідності витрат на повномасштабне утримання РЗФ) закриття РЗФ стає неминучим, і критерій оцінки ефективності функціонування ГЗК зводиться до співставлення витрат на видобуток товарної руди і прибутку від її реалізації як уже кінцевої продукції.

Виділяються два етапи виведення РЗФ:

- робота фабрики з продуктивністю, що знижується, і почерговим виведенням і реалізацією тієї частини обладнання, яке перестає завантажуватися внаслідок цього зниження;
- демонтаж і реалізація устаткування, конструкцій і матеріалів після повної зупинки фабрики.

Спрощено критерій має вигляд:

$$\sum Z_{зф} \langle (V_k C_k - V_p C_p) \rangle \quad (1),$$

де $Z_{зф}$ – витрати на утримання збагачувальної фабрики;

V_p – обсяги руди, які переробляє ЗФ;

V_k – обсяги одержуваного концентрату;

C_k – ціна концентрату;

C_p – ціна руди.

Для усього процесу (руда → концентрат → агломерат → окотиші) цей критерій набуде вигляду:

$$\sum Z_i \langle \sum (V_i C_i) - V_p C_p \rangle \quad (2),$$

де Z_i – витрати на утримання i -х переробних потужностей;

V_i – обсяг i -ї залізорудної продукції;

C_i – ціна залізорудної продукції i -го виду.

Витрати на утримання збагачувальної фабрики можна виразити як

$$Z_{зф} = V_k C \quad (3)$$

Відомо, що $V_k = V_p \gamma$, тоді витрати на утримання РЗФ мають вигляд:

$$Z_{зф} = V_p \gamma C \quad (4),$$

де C – собівартість збагачення;

γ – показник виходу концентрату на РЗФ.

Виходячи з виразу (1), співвідношення можна записати як:

$$V_p \gamma C \leq (V_p \gamma C_k - V_p C_p) \quad (5)$$

Після скорочення та перетворення вираз (5) набуває вигляду:

$$C \leq (C_k - \frac{C_p}{\gamma}) \quad (6)$$

Якщо прийняти значення собівартості переробки мінеральної сировини як мінімально допустиме (граничне) для нормального функціонування РЗФ, то на основі даних, розрахованих за виразом 6, можна побудувати графіки (рис. 2), які дозволяють визначити область значень собівартості за змінних значень цін на концентрат та руду за різних показників виходу концентрату.

На графіках пунктиром позначено мінімальну ціну на концентрат, за якої, з урахуванням ціни на руду та собівартості, треба прийняти рішення про виведення з експлуатації всієї РЗФ або її частини

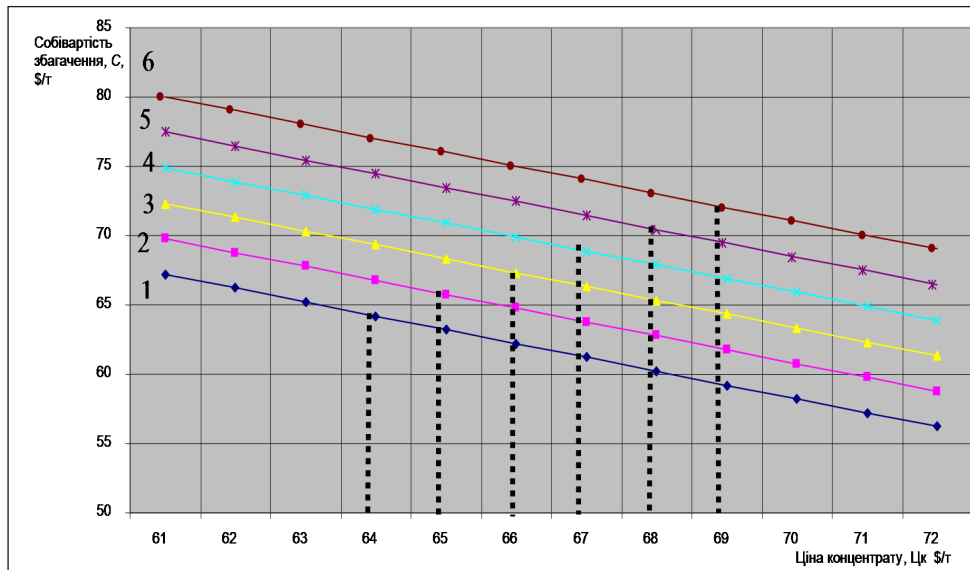


Рис. 2. Залежність мінімальної собівартості РЗФ від рівня цін на концентрат за різних значень ціни на руду за виходу концентрату $\gamma=39\%$.
Ціна руди: 1 – 50 \$/т; 2 – 51 \$/т; 3 – 52 \$/т; 4 – 53 \$/т; 5 – 54 \$/т; 6 – 55 \$/т

(секції) та перенаправлення фінального рудопотоку на інший ГЗК. Слід враховувати собівартість транспортування руди на РЗФ іншого ГЗК, тому що ціна руди на вході РЗФ буде збільшена на величину цих витрат:

$$C_{p2} = C_{p1} + C_{tr} \quad (7)$$

де C_{p2} – ціна руди на РЗФ другого ГЗК;

C_{p1} – ціна руди на РЗФ ГЗК, де вона була видобута;

C_{tr} – собівартість транспортування руди з першого на другий ГЗК.

Підвищення ціни руди на РЗФ іншого ГЗК впливатиме на собівартість збагачення, але за рахунок збільшення обсягів руди на вході збагачувального виробництва зростання собівартості не буде пропорційним.

Для визначення необхідності виводу з експлуатації РЗФ і перенаправлення рудопотоку вхідної руди на інший ГЗК було розроблено алгоритм (рис. 3), побудований за допомогою цільової функції $C=f(X_p, Y_p, Z_p, K_j) \Rightarrow \min$. Алгоритм допомагає прийняти рішення, виходячи з того, чи є збагачувальне виробництво рентабельним за діючих цін на руду та концентрат.

Відомо, що ціни на руду та концентрат не є постійними, коливання ціни на концентрат мають дуже широкий діапазон: за десятиріччя він становив від 120 \$/т в 2007 р. до 65 \$/т в 2017 р., а песимістичний прогноз на 2018 р. цін на залізну руду виглядає як можливе падіння її нижче рівня 60 \$/т. Тому наявність алгоритму визначення необхід-

ності виводу з експлуатації РЗФ на тому ГЗК, де собівартість переробки є вищою за ціну реалізації концентрату, є досить актуальним.

Протягом двох особливих періодів на собівартість збагаченої продукції (в перший період) впливатиме – опосередковано – прибуток від продажу збагачувальних секцій (підперіоди), що послідовно зупиняються, а на собівартість товарної руди як кінцевої продукції після повного припинення збагачення (другий період) – надходження від реалізації основних фондів та інших активів РЗФ у цілому.

Безумовно, розпродаж демонтованих, а також цілісних основних фондів, виведених з експлуатації, відображається на фінансових показниках ГЗК у цілому, тому умовно можна співвіднести такий грошовий рух із собівартістю продукції в ці періоди – виключно для оціночної мотивації управлінських рішень.

1 період:

$$C_{z.n.n.i} = \{B_{z.n.n.j} - [\sum (H_i - D_i) + \sum \Delta_i P_i]\} / V_{z.n.n.j} \quad (8)$$

де $C_{z.n.n.j}$ – собівартість збагаченої продукції в j -й підперіод;

$B_{z.n.n.j}$ – сумарна вартість збагаченої продукції, виробленої в j -й підперіод;

H_i – надходження від продажу i -х виведених з експлуатації активів у j -й підперіод;

D_i – вартість демонтажу та реалізації i -х ресурсів у j -й підперіод;

$\Delta_i P_i$ – побіжні заощадження від скорочення споживання i -х ресурсів у j -й підперіод (прямі – враховуються у вартості збагачення руди);

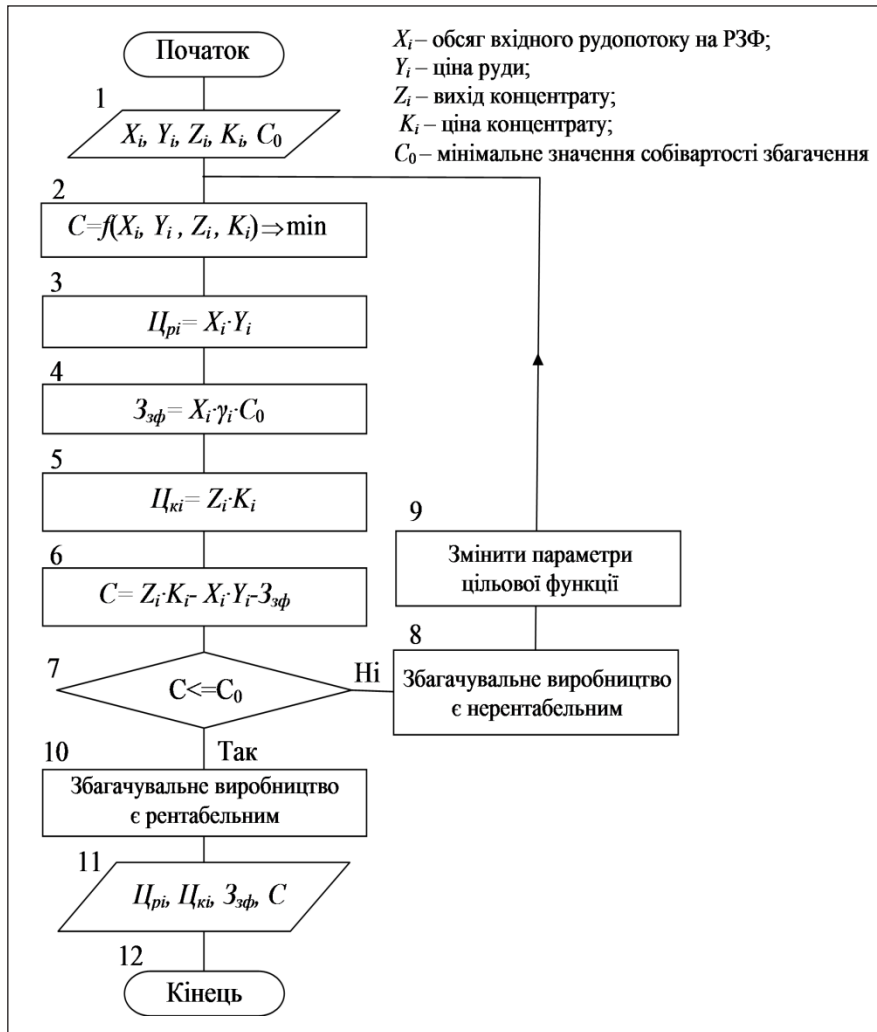


Рис. 3. Алгоритм для визначення доцільності експлуатації РЗФ або перенаправлення фінального рудопотоку на інший ГЗК

$V_{з.н.Пj}$ – обсяги збагаченої продукції, виробленої в j -й підперіод.

2 період:

$$C_{m,p,2} = \{B_{m,p,2} - [\sum(H_i - D_i) + \sum \Delta_i P_i] + \sum \Delta_{URZ\Phi}\} / V_{m,p,2} \quad (9),$$

де $C_{m,p,2}$ – собівартість товарної руди в i -й період;

H_i – надходження від продажу i -х виведених з експлуатації активів у i -й підперіод;

D_i – вартість демонтажу та реалізації i -х ресурсів у i -й підперіод;

$\Delta_i P_i$ – побіжні заощадження від скорочення споживання i -х ресурсів у j -й підперіод (прямі – враховуються у вартості збагачення руди);

$\Delta_{URZ\Phi}$ – решткові витрати на утримання РЗФ

$V_{m,p,2}$ – обсяги товарної руди в i -й період.

Такий підхід дозволяє оперативно оцінити, наскільки «пом'якшується» кожен із перехідних періодів компенсаторним впливом зі скороченням обсягів збагачення руд матеріальних надходжень,

що дає змогу визначати і планувати узагальнені параметри досліджуваних систем і час, необхідний на підготовку та своєчасне превентивне впровадження заходів щодо технологічної реорганізації РЗФ і перенаправлення рудних вантажопотоків ГЗК.

Для ГЗК Кривбасу, за наявності щільного територіального розташування, фактором управління якістю рудопотоків стає можливість, у разі визначення доцільності, включення до фінального рудопотоку комбінату також і сировини з інших комбінатів басейну.

Висновки.

1. Набула подальшого розвитку теорія управління якістю рудопотоків залізрудних ГЗК за рахунок створення концепції генералізації технології в масштабах ГЗК.

2. Для визначення необхідності виводу з експлуатації РЗФ та перенаправлення фінального рудопотоку на інший ГЗК було розроблено критерій та алгоритм.

Список літератури:

1. Бызов В.Ф. Управление качеством продукции карьеров: учебник. Москва, 1991. 239 с.
2. Бастан П.П. Смешивание и сортировка руд. Москва, 1990. 168 с.
3. Азарян А.А., Азарян В.А., Вилкул Ю.Г., Колосов В.А. Качество железорудного сырья подземной и открытой добычи как основа конкурентоспособности горнодобывающей промышленности Украины. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2012. № 5. С. 1–4.
4. Азарян В.А., Жуков С.А. Обоснование периода опробования забоев карьера. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*. 2017. № 51. С. 8–18.
5. Азарян В.А. Система контроля и управления качеством в рудопотоках железорудных карьеров. *Вісник Криворізького національного університету*. 2016. Вип. 41. С. 170–174.
6. Азарян В.А., Жуков С.А. Ресурсные перспективы ГОКов Кривбасса и концепция технологии управления интегрированным грузопотоком, генерализованной в масштабах комбината. *Качество минерального сырья*. 2017. С. 564–571.
7. Азарян В.А. Комплексная система контроля и управления качеством в рудопотоках карьеров. *Комбинированные технологии разработки месторождений глубокими карьерами и шахтами. Материалы международного симпозиума (пгт Паргенит 18–23 июня 2012 г.)*. Кривой Рог, 2012. С. 145–152.
8. Азарян В.А. Разработка функциональной и структурной схемы управления качеством рудопотоков карьера. *The goals of the World Science 2017. Proceedings of the III International Scientific and Practical Conference (Dubai, UAE January 31, 2017.)*. № 2 (18). Dubai, 2017. P. 20–24.
9. Азарян А.А., Азарян В.А., Черкасов О.В. Исследование основных и дополнительных факторов, влияющих на точность каротажа взрывных скважин. *Отчет по хозяйственной теме 0115U003054 № 2-35-15*. Кривой Рог, 2015. 33 с.

РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ РУДОПОТОКОВ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ ГОРНО-ОБОГАТИТЕЛЬНЫХ КОМБИНАТОВ

В статье проанализированы технологические и финансовые потери железорудных горно-обогажительных комбинатов от колебаний качества финальных рудных грузопотоков, которые являются входным сырьем рудообогатительных фабрик. Авторами предложена концепция генерализации, суть которой заключается в объединении всех средств контроля, сортировки и шихтовки руд в единую, технологически доминирующую в масштабе не только отдельного карьера, но и всего горно-обогажительного комбината, компьютеризированную систему, подчиненную общей целевой алгоритмизации. Обоснованна концепция генерализации технологии управления качеством интегрированных рудопотоков железорудных горно-обогажительных комбинатов. Получила дальнейшее развитие теория управления качеством в условиях открытых горных работ. Также в статье рассмотрена проблема остановки производственных мощностей обогатительного комплекса по мере снижения добычи железорудного карьера, разработан критерий и алгоритм оценки целесообразности вывода из эксплуатации всей рудообогатительной фабрики или ее части (секции) и перенаправления финального рудопотока на другой горно-обогажительный комбинат.

Ключевые слова: горно-обогажительный комбинат, рудообогатительная фабрика, карьер, управление качеством рудопотока, содержание полезного компонента.

DEVELOPMENT OF THEORY OF MANAGING THE QUALITY OF OUTPUTS OF IRON ORE PROCESSING PLANTS

The article analyzes the technological and financial losses of ore-mining and processing plants caused by fluctuations of the quality of the final ore cargo flows, which are the input raw materials of the ore-enriching factories. The authors proposed a concept of a computer system subordinated to general target algorithmization that is based on a principle of generalization, essentially combining all means of control, sorting and blending of ores into a single, technologically dominant scheme that will be universally applicable for any quarry, and not in just one particular case. Substantiation of the concept of generalization of the technology of quality management of integrated ore deposits of iron mining and processing plants has further developed the theory of quality management in open mining operations. Also, the article deals with the problem of halting the production capacities of the enrichment complex as iron ore yields are declining. It has an aim to develop a criterion and algorithm for assessing the expediency of decommissioning the entire ore enriching and processing plant or its part (section) and redirecting the final ore flow to another processing plant.

Key words: mining and concentrating plant, ore dressing plant, quarry, management of the quality of ore flow, the grade of ore.

УДК 621.3:622:519.24

Кобылянский Б.Б.

Украинская инженерно-педагогическая академия

Мнухин А.Г.

Запорожская государственная инженерная академия

АНАЛИЗ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФАКТИЧЕСКОГО УРОВНЯ БЕЗОПАСНОСТИ УГОЛЬНЫХ ШАХТ, ОПАСНЫХ ПО ГАЗУ ИЛИ ПЫЛИ, С УЧЕТОМ ДЕЙСТВИЙ ПЕРСОНАЛА, СОСТОЯНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ И СРЕДЫ

Рассмотрены производственные комплексы, в т. ч. шахта, с позиции человек – машина – среда. По единой методике проведена оценка безопасности с последующим нормированием требуемых вероятностей нормальной или безаварийной работы предприятия с учетом действий обслуживающего персонала и влияния окружающей среды. Разработана методология оценки возможной аварийности, на этой основе выполнены расчеты, обеспечивающие оптимальный выбор последовательности действий по ее предупреждению. Предложенная методология позволяет повысить безопасность работы горного производства путем оптимального расположения имеющихся на конкретном предприятии материально-технических ресурсов.

Ключевые слова: методы регрессионного анализа, анализ безопасности, сложные эргатические системы.

Постановка проблемы. Участвовавшие в последнее годы на шахтах Украины крупные аварии со значительными социальными и материальными потерями влекут за собой необходимость анализа произошедшего с разных позиций, с использованием разных методов. Термины «анализ риска» и «оценка риска» достаточно известны специалистам, так как именно на них базируются критерии надежности и требования безопасности к эргатическим системам.

Общий уровень травматизма в Украине остается достаточно высоким, одним из самых высоких в мире. И если на предприятиях с высокой долей частного капитала, например у ДТЭК Павлоградуголь, в 2017 г. при повышении объемов добычи до 20 млн тонн угля в год уровень травматизма на шахтах снизился на 9%, то на предприятиях государственной собственности, по данным, представленным председателем Независимого профсоюза горняков Украины Михаилом Волинцом УНИАН в 2016 г., количество несчастных случаев со смертельным исходом на государственных предприятиях угольной отрасли Украины увеличилось в 2 раза. Согласно пресс-релизу М. Волинца, количество случаев общего травматизма за 9 месяцев этого года выросло на 21,6%

по сравнению с аналогичным периодом прошлого года – до 355 случаев.

Численный анализ безопасности многофункциональных систем был введен в практику в начале 1970-х гг. после катастрофических аварий на подземных комплексах запуска межконтинентальных ракет. Ныне пришло время практической реализации подобных подходов для оценки и нормирования потенциального риска работы в промышленности, в частности на таком сложном эргатическом объекте, каким является угольная шахта, с определением риска как вероятности человеческих жертв и материальных потерь или повреждений.

Анализ последних исследований и публикаций. Попытки оценить безопасность в шахте предпринимались, в частности, применительно к системам подземного электроснабжения [1; 2], горношахтного оборудования методом планирования режима обслуживания [3], а также состояния горного массива, т. е. непосредственно окружающей среды [4]. Именно эти работы послужили основой нового научного направления, которое позволило установить численное взаимоотношение как между составляющими частями угольной шахты, опасной по выбросам газа или

пыли, так и эргатического объекта типа человек – машина – среда.

Согласно исследованиям [5; 6], угольную шахту с учетом взаимодействия обслуживающего персонала, оборудования и среды будем рассматривать как эргатическую систему человек – машина – среда. Нормальное функционирование данной системы определяется взаимодействием персонала, оборудования и среды, которые характеризуются соответственно работоспособностью, исправностью и оптимальностью. В зависимости от поддержания на должном уровне указанных параметров, в системе будет осуществляться работа нормальная, безаварийная или аварийная.

Изложение основного материала исследования. Анализ показал, что в отрасли не охвачена статистикой большая часть факторов, подлежащих анализу, например, виды ошибок персонала, а данные по другим факторам (состояние персонала, оборудование) имеют явно недостоверный характер. Поэтому наиболее целесообразно определять основные параметры, характеризующие работу шахты, опасной по газу или пыли, используя методы экспертных оценок [7], позволяющие при достаточно широком (до 90% угольных предприятий Украины) и компетентном круге опрашиваемых специалистов (технические директоры и специалисты по безопасности работ) корректно решить указанные проблемы.

Разработанная методология оценки возможной аварийности [8] и выполненные на ее основе расчеты, обеспечивающие оптимальный выбор последовательности действий по ее предупреждению, обладают существенным недостатком, характерным для расчетов такого типа, так как используют аппарат условных вероятностей. В результате расчетов не определена их статическая надежность, без которой практическая реализация анализа в определенной мере становится некорректной.

В этом случае для оценки собранного путем опроса специалистов статистического материала и полученных на эргатической основе расчетов было бы возможно применить методы параметрической статистики, алгоритм реализации которых подробно изложены в работе [10].

Уравнение регрессии, выходным фактором которого является P_a , построенное методами, изложенными в работах [10, 11], имеет вид:

$$P_a = 0,102 - 0,25P_1 - 0,0003P_3 + 0,237P_4 + 0,0003P_8 - 0,198P_{10} + 0,052P_{13} + 0,146P_{14} - 0,121P_{21} \quad (1)$$

Критерий Фишера полученного уравнения составляет 13 406,7, что значительно больше пре-

дельного значения, равного 5,32. Используя для анализа значения Т-критериев Стьюдента, для каждого члена уравнения определяем устойчивость регрессионных коэффициентов, корректируя уравнение (1). Низкие значения Т-критериев Стьюдента для коэффициентов a_2 и a_4 (факторы P_3 и P_8 соответственно) совпадают с практически незначимыми по абсолютным значениям этих же коэффициентов ($\pm 0,0003$). В связи с этим факторы P_3 и P_8 можно вывести из регрессионного уравнения, которое после корректировки имеет вид:

$$P_a = 0,102 - 0,25P_1 + 0,24P_4 - 0,20P_{10} + 0,05P_{13} + 0,15P_{14} - 0,12P_{21} \quad (2)$$

Значения вероятностей состояний угольной шахты, полученные указанными методами, использовались для оценки безопасности и работоспособности угольной шахты (табл. 1).

Таблица 1

Значения вероятностей состояний угольной шахты

Номер элемента схемы состояний	X_{\min}	X_{\max}	\bar{X}	σ
P_1	0,100	0,400	0,208	0,103
P_2	0,200	0,750	0,408	0,167
P_3	0,250	0,800	0,492	0,188
P_4	0,150	0,400	0,258	0,084
P_5	0,050	0,500	0,167	0,171
P_6	0,150	0,650	0,450	0,266
P_7	0,200	0,900	0,383	0,189
P_8	0,200	0,600	0,433	0,141
P_9	0,400	0,800	0,567	0,141
P_{10}	0,400	0,900	0,677	0,172
P_{11}	0,100	0,600	0,323	0,172
P_{12}	0,015	0,750	0,378	0,207
P_{13}	0,250	0,985	0,623	0,207
P_{14}	0,015	0,500	0,186	0,117
P_{15}	0,200	0,815	0,469	0,126
P_{16}	0,125	0,400	0,288	0,081
P_{17}	0,060	0,600	0,243	0,175
P_{18}	0,250	0,900	0,597	0,200
P_{19}	0,100	0,500	0,262	0,143
P_{20}	0,100	0,640	0,252	0,155
P_{21}	0,000	0,310	0,142	0,132

Определяем фактический уровень безопасности эксплуатируемых в настоящее время угольных шахт, опасных по газу или пыли, с учетом действий персонала, состояния оборудования и среды. Вероятности режимов работы угольной шахты:

– нормальная работа:

$$P_n^1 = 3,83 * 10^{-1}; P_n^2 = 1,60 * 10^{-2}; P_n^3 = 4,27 * 10^{-1}; P_n^4 = 6,00 * 10^{-2}$$

Отклонение от средней вероятности

Вероятность	-3σ	-2σ	-σ	X	σ	+σ	+2σ	+3σ
P_3	-0,072	0,116	0,304	0,492	0,188	0,680	0,868	1,056
P_6	-0,347	-0,081	0,184	0,450	0,266	0,716	0,981	1,247
P_9	0,143	0,284	0,426	0,567	0,141	0,708	0,850	0,991
P_{12}	-0,244	-0,037	0,171	0,378	0,207	0,585	0,793	1,000
P_{15}	0,089	0,216	0,343	0,469	0,126	0,595	0,722	0,848
P_{18}	-0,003	0,197	0,337	0,597	0,200	0,797	0,997	1,197

– безаварийная работа:

$$P_6^1=8,00 \cdot 10^{-3}; P_6^2=4,10 \cdot 10^{-2}; P_6^3=6,10 \cdot 10^{-2};$$

$$P_6^4=2,00 \cdot 10^{-3}; P_6^5=0,00; P_6^6=1,00 \cdot 10^{-3}.$$

$$\text{Тогда } P_n=8,86 \cdot 10^{-1}; P_8=1,13 \cdot 10^{-3}; P_a=10,81 \cdot 10^{-4}.$$

Разработанную методологию можно применить для решения аналогичных задач и в других смежных отраслях промышленности, функционирование которых связано с действиями персонала значительной численности и разной квалификации, высокой насыщенностью потенциально опасных машин и механизмов, часть которых расположена в потенциально опасной или нестабильной среде.

Определяем вероятность нормальной работы угольной шахты в случае технологического отказа персонала, приведшего к его функциональной ошибке.

Значения условных вероятностей $P_2 = 0,50$; $P_4 = 0,25$; $P_8 = 0,50$ определяют путем опроса ведущих технических специалистов данного предприятия:

$$P_n^3 = P_2 \cdot P(S_4 \cdot S_2) + P_8 - P(S_4 \wedge S_8);$$

$$P_n^3 = 0,50 \cdot 0,25 \cdot 0,50 + 0,50 - 0,25 = 0,312.$$

Определяем вероятность безопасной работы шахты при появлении неисправности оборудования, которая приводит к дефекту и возникновению усложненных условий эксплуатации.

Значения условных вероятностей $P_9 = 0,50$; $P_{10} = 0,70$ определяют путем опроса (методом экспертных оценок):

$$P_6^2 = 0,50 \cdot 0,70 = 0,350.$$

Таким образом, методом, изложенным в настоящей работе, совместно с формализованным опросом специалистов соответствующего профиля и уровня, установлены численные значения фактических уровней вероятностей безопасной работы конкретной шахты в зависимости от рассмотренных условий состояния её эргатических компонентов. В случае каких-либо существенных изменений подземного производства, например, при его расширении или модернизации, можно провести корректировку параметров безопасности.

Прежде, чем приступить к сопоставлению полученного значения P_a с расчетными, определенными исходя из иного методического подхода, например, приведенного в работе [11] или принятыми на основе нормативных документов [12; 13] для угольной шахты, отметим принципиальное различие предлагаемых методов. Следует также учитывать, что традиционные методы оценки безопасности шахт, как правило, не позволяют четко установить и оценить причинно-следственные зависимости: ошибки персонала – плохая подготовка или болезнь, отказ оборудования – низкое качество его проектирования, изготовления или обслуживания и т. д. В связи с изложенным, для оценки конечных результатов полученные расчетные значения целесообразно сопоставить с нормативными. Например, при 100–200 единицах оборудования или 10–20 участках вероятность аварии P_a , принимаемая в данном случае равной сумме предельных значений вероятностей взрыва P_v , пожара P_p и поражения РЭП, может быть приближенно определена по формуле

$$P_a = P_v + P_p + P_{ЭП}, \quad (3),$$

соответственно

$$P_a = 10^{-6}(10 - 20) + 10^{-6}(100 - 200) + 10^{-6} = 1,11 \cdot 10^{-4} \dots 2,21 \cdot 10^{-4}.$$

Отклонение от среднего этих шести вероятностей, выраженных через σ (см. табл. 1), приведены в табл. 2. Полученные методом сглаживания трендов [9] и реализованные в последующих расчетах значения вероятностей $P_3, P_6, P_9, P_{12}, P_{15}$ и P_{18} при настоящем уровне состояния шахт можно рассматривать как перспективные и вполне достижимые, хотя и порознь, на некоторых шахтах в настоящее время.

При современном техническом оснащении шахт значения P_a уже сегодня не должны превышать $10,81 \times 10^{-4}$ за год. Следовательно, количество аварий, например на 144 шахтах, должно быть не более

$$N_a = 144 \times 10,81 \times 10^{-4} = 0,156 \text{ 1/год},$$

что существенно (примерно на 1,5 порядка) ниже средней аварийности, которая характерна для

шахт України в настоящее время, а уровень риска будет достигать примерно соответствующего значения для транспорта в странах дальнего зарубежья. Такой уровень безопасности недостаточен для угольной отрасли, в связи с чем необходимо принимать меры для его эффективного повышения.

Расчеты выполнялись на основе статистических данных по аварийности и состоянию энергохозяйства (количество обслуживаемого оборудования, численность персонала, количество зарегистрированных нарушений действующей нормативной документации, установленная мощность). Причем при расчетах, исходя из трудоемкости обслуживания, 5 км кабельной сети приравнивались к единице высоковольтного оборудования. Статистический подход основан на методах регрессионного анализа, разработан для определения расположения бифуркационных линий множества катастрофы сборки на пространстве управления.

Статистические характеристики данных ежегодной аварийности систем подземного электроснабжения приведены в табл. 3.

Полученные на основе этих данных значения параметров уравнений бифуркационных линий, расположенных на двумерном пространстве управления (см. рис. 1), приведены в табл. 4 [14].

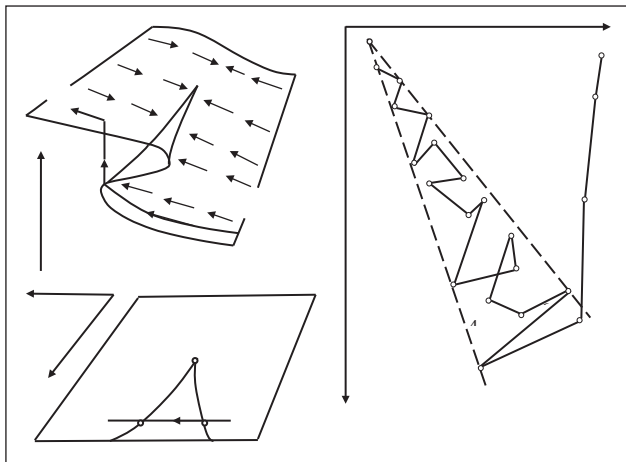


Рис. 1. Типичная катастрофа сборки данных по безопасности систем подземного электроснабжения

Анализируя исходные данные для расчетов [8] и полученные зависимости (см. рис. 2), отметим, что совпадение с точностью до доверительного интервала (точность расчетов) соответствующих бифуркационных линий для выходных факторов «авария» и «аварийная ситуация» указывает на недостаточную эффективность действия служб, отражающих аварийные ситуации, которые возникают в условиях эксплуатации.

Рассмотрим пример из практики эксплуатации горношахтного электрооборудования, которым комплектуются шахты Украины. Отметим, что сопоставление работы и обслуживания электрооборудования на отечественных предприятиях с аналогичными зарубежными практически некорректно вследствие использования технических устройств других типов и ограниченных сведений о технологии обслуживания. Поэтому значительный интерес представляет процесс эксплуатации систем электроснабжения мощностью 6 кВ на шахтах прибалтийских государств в сопоставлении с аналогичным процессом на шахтах Украины.

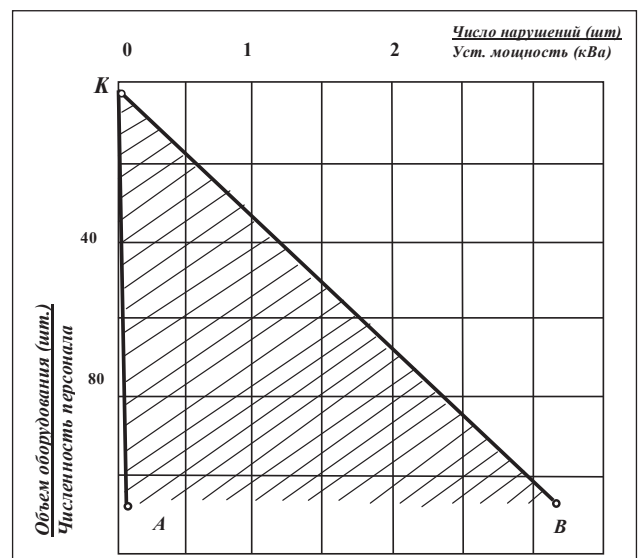


Рис. 2. Бифуркационные линии катастроф сборки данных по безопасности систем подземного электроснабжения

Система электроснабжения построена исключительно на использовании морально устаревших ячеек РВД-6 с масляным выключателем ВМБ-10 выпуска более чем 40-летней давности. Однако наличие минимальной ремонтной базы непосредственно на месте установки ячеек РВД-6 в сочетании с их регулярным поочередным обслуживанием позволило добиться отличного состояния и практически безаварийной работы. В этом случае увеличение количества сотрудников службы эксплуатации оборудования напрямую связано с повышением надежности его работы.

Из сопоставления рис. 1 и 2 также вытекает, что заштрихованная зона AKB представляет собой проекцию неустойчивого участка сборки, т. е. пространства переменных состояний, проектируемого на пространство управления (площадь AKB) трижды. Таким образом, для ликвидации условий, в которых возникают аварийные ситуации или непосредственно аварии, режим эксплу-

Таблица 3

Статистические характеристики данных ежегодной аварийности систем подземного электроснабжения

Фактор F	F_{\max}	F_{\min}	\bar{X}	σ
1. Аварийная, ед. / Суточная производительность, т	$3,24 \times 10^{-7}$	0	$6,66 \times 10^{-8}$	$1,04 \times 10^{-7}$
2. Аварийная, ситуация, ед. / Суточная производительность, т	$5,14 \times 10^{-5}$	$1,35 \times 10^{-6}$	$1,91 \times 10^{-5}$	$1,48 \times 10^{-5}$
3. Количество оборудования, шт. / Численность персонала, чел.	126,18	0,18	15,90	34,92
4. Количество нарушений, ед. / Установленная мощность, кВт·А	$2,71 \times 10^{-1}$	0	$2,76 \times 10^{-2}$	$7,75 \times 10^{-2}$

Таблица 4

Значения параметров уравнений бифуркационных линий

Бифуркационная линия	A	B	SA	SB
КА	$1,38 \times 10^{-5}$	$6,76 \times 10^{-5}$	$0,33 \times 10^{-5}$	$1,12 \times 10^{-5}$
KB	$2,55 \times 10^{-2}$	0,12	$0,21 \times 10^{-2}$	0,27

атации системы подземного электроснабжения необходимо выбрать таким, чтобы характеризующие его параметры (координаты: приведенное количество нарушений – приведенный объем обслуживания) находились в пространстве переменных состояний, ограниченном бифуркационными линиями *КА* и *KB*.

Выполнив непосредственно численный анализ рис. 2, можно также сделать вывод, что вследствие высокой крутизны бифуркационной линии *КА* снижение приведенного объема обслуживания как метод борьбы с аварийностью не обладает высокой эффективностью. Более эффективны в данном случае методы, направленные на снижение количества нарушений обслуживающим и ремонтным персоналом требований нормативно-технической документации и выполнения регламента обслуживания электрооборудования. Причем предлагаемые рекомендации вполне реализуемы в реальных производственных условиях,

так как требуют снижения количества нарушений при эксплуатации фактического количества оборудования не более чем в 4–6 раз.

Выводы. Учитывая значительные расхождения вероятностей ошибок различного рода, возникающих при обслуживании систем подземного электроснабжения на разных предприятиях (2,8–13,3 раза), полученные теоретическим путем рекомендации вполне согласуются с данными по безопасности существующего электрооборудования, полученными на действующих шахтах разных регионов Украины статистическими методами. Следовательно, существенное увеличение численности обслуживающего персонала без осуществления кардинальных мероприятий по перестройке службы эксплуатации не снизит аварийность в системах подземного электроснабжения. Для этого необходима коренная перестройка всего режима эксплуатации горношахтного электрооборудования.

Список литературы:

1. Хенли Э.Д., Кумамото Х. Надежность технических систем и оценка риска. Москва: Машиностроение. 1984. 528 с.
2. Mnykhin A., Bryukhanov O. Optimization of coal mine parameters to provide safe operation. Technology at the service of environment. Komeko, 2003. Vol. II. P. 91–106.
3. Мнухин А.Г., Брюханов А.М., Иорданов И.В. Технологии XXI века. Электрогидравлика. Макеевка-Донецк: ВИК, 2012. Т. 1. 432 с.
4. Мнухин А.Г., Брюханов А.М., Вовченко А.Р. Оптимизация обслуживания шахт, исходя из их аварийности. Наук. вісн. НГАУ. 2002. № 1. С. 83–86.
5. Зорин А.Н., Халимендик Ю.М., Колесников В.Г. Механика разрушения горного массива и использование его энергии при добыче полезных ископаемых. Москва: Недра. 2001. 412 с.
6. ДСТУ 2293: Охорона праці. Терміни та визначення основних понять. Чинний від 01 травня 2015 р. Вид. офіц. Київ: Мінекономрозвитку України, 2015.
7. Юрнев А.П., Сахаров Б.Д., Сытин А.В. Аварии под водой. Л.: Судостроение, 1981. 144 с.
8. Кобылянский Б.Б., Мнухин А.Г. Оценка горного производства на эргатической основе. Вісті Донецького гірничого інституту. 2015. № 1 (36) – № 2 (37). С. 83–92.

9. Ширяев А.Н. Вероятность. Москва: Наука, 1980. 576 с.
10. Бешелев С.Д., Гурвич Ф.Г. Математико-статистические методы экспертных оценок. Москва: Статистика, 1980. 263 с.
11. Мнухин А.Г., Коневский Б.И. Защита электрических сетей шахт от коммутационных перенапряжений. Москва: Недра. 1987. 143 с.
12. Мнухин А.Г., Коневский Б.И. Планирование эксперимента при исследованиях коммутационных перенапряжений в электрических сетях. Электричество. 1984. № 11. С. 17–18.
13. Методы анализа данных / пер. с франц. под ред. С.А. Айвазяна, В.М. Бухштабера. Москва: Финансы и статистика, 1985. 357 с.
14. Горский В.Г. Об оценке рисков в сфере технического регулирования. Москва, 2003. 12 с.

АНАЛІЗ І ВИЗНАЧЕННЯ ФАКТИЧНОГО РІВНЯ БЕЗПЕКИ ВУГІЛЬНИХ ШАХТ, НЕБЕЗПЕЧНИХ ЧЕРЕЗ ГАЗ АБО ПИЛ, З УРАХУВАННЯМ ДІЙ ПЕРСОНАЛУ, СТАНУ ОБЛАДНАННЯ І СЕРЕДОВИЩА

Розглянуто виробничі комплекси, в т. ч. шахту, з позиції людина – машина – середовище. За єдиною методикою проведено оцінку безпеки з подальшим нормуванням необхідних ймовірностей нормальної або безаварійної роботи підприємства з урахуванням дій обслуговуючого персоналу і впливу навколишнього середовища. Розроблено методологію оцінки можливої аварійності, на цій основі виконані розрахунки, що забезпечують оптимальний вибір послідовності дій щодо її попередження. Запропонована методологія дозволяє підвищити безпеку роботи гірничого виробництва шляхом оптимального розташування наявних на конкретному підприємстві матеріально-технічних ресурсів.

Ключові слова: методи регресійного аналізу, аналіз безпеки, складні ергатичні системи.

ANALYSIS AND DETERMINATION OF THE ACTUAL SAFETY OF COAL MINES, DANGEROUS FOR GAS OR POWDER, WITH ACCOUNT OF PERSONNEL, EQUIPMENT AND ENVIRONMENT

Production complexes are considered, including mine, from the position of man – machine – environment. According to a uniform methodology, a safety assessment was carried out with subsequent normalization of the required probabilities of normal or accident-free operation of the enterprise taking into account the actions of the maintenance personnel and the influence of the environment. A methodology for estimating a possible accident rate has been developed, and calculations have been made on this basis to ensure the optimal choice of the sequence of actions to prevent it. The proposed methodology makes it possible to increase the safety of mining operations through the optimal location of the material and technical resources available at a particular enterprise.

Key words: methods of regression analysis, safety analysis, complex ergatic systems.

Kosenko A. V.

State institution of higher education
“Kryvyi Rih National University”

INCREASE OF EFFICIENCY OF TECHNOLOGICAL PROCESS OF ORE DRAWING AND DELIVERY OF ORE MASS AT DEVELOPMENT OF DEPOSITS OF NATURAL-RICH IRON ORES ON LARGE DEPTHS

The scientific article gives an investigation of technological solutions for intensity the ore drawing, which will improve the completeness of extraction of freed ore and the quality of ore mass. As a result, it has been established that one of the key solutions to this problem is the use of a combined method for the delivery of ore and ore mass with the help of the “multi-bucket scraper winches – self-propelled loading and unloading machine” complex. Since the application of this complex is most adapted to the complex geomechanical conditions of the deep horizons of the Kryvbas mines. Research and technological solutions for decreasing the amount of localization of ore mass hanging in the draw-points upto 1,4–2,2% are presented, which will allow increasing the operational productivity of the scraper winch up to 600–700 tons/shift. And it will also make it possible to increase the intensity of the technological process of ore drawing from 1,5 to 5,5–6,2 tons/m² per day and the extraction of clean ore to 10,5%.

Key words: *deep horizons, intensification of mining operations, recovery percentages, natural-rich iron ores, self-propelled loading and unloading machinery, combined ore delivery method.*

The problem and its connection with the scientific and practical tasks. To date, the development of natural deposits of rich iron ore in underground mines Kryvbas made at a depth of 1200–1400 m under significant influence of gravitational stress fields with different options sublevel caving method characterized by low rates of ore extraction and design complexity, with increasing depth reduces the competitiveness of underground mining enterprises [1]. Under these conditions, the reserves for further design and technological upgrade sewage extraction technology based on the use of obsolete fixed and hand-held equipment is almost exhausted [1–4].

Research and publications analysis. Analysis of the current domestic and foreign experience, scientific works and project materials prove that at the moment the main problem of mining natural rich iron ore is the intensification of its production and the introduction of advanced methods of production using modern mechanization of all production processes [1–8]. Since it is proved that the intensification of extraction long-hole stoping improve the competitiveness of the mining enterprises of Kryvyi Rih iron ore basin. But the large-scale introduction of the self-propelled machines hinder sophisticated geomechanical conditions of deep horizons of mines Kryvbas, especially in the process of delivery of ore mass since the release

of the ore through the crosscut, located at the base of draw-ball of production level, it is extremely difficult to keep the workings of cross-sectional area of 12–14 m² during their lifetime while ensuring maximum quality and quantity of ore extraction [9]. This raises the question of changing the design of the production level.

To solve this problem, developed a combined method of delivery of ore from the discharge openings to the system of capital ore passes, through scrapers on the horizon, the primary delivery and Load-Haul-Dump on the horizon secondary delivery, which is the most adapted to the complex geomechanical conditions of deep horizons of mines Kryvbas [10].

The disadvantages of this method of delivery is that the combination of vehicle the roof load-delivery cross drift and foot wall roadway complicated ventilation openings initial delivery. As a result, scrapers driver installation is in a niche that is not ventilated. As well as the formation of ore mass invasion foot wall roadway small volume, which reduces the use of self-propelled vehicles for change if the process simple scrapers installation. But still the main drawback of this technological scheme is to ensure the performance of a scraper winch within 200 tons/shift [4]. Since there is a significant loss in performance due to the localization of hangs, which is an average of 15%

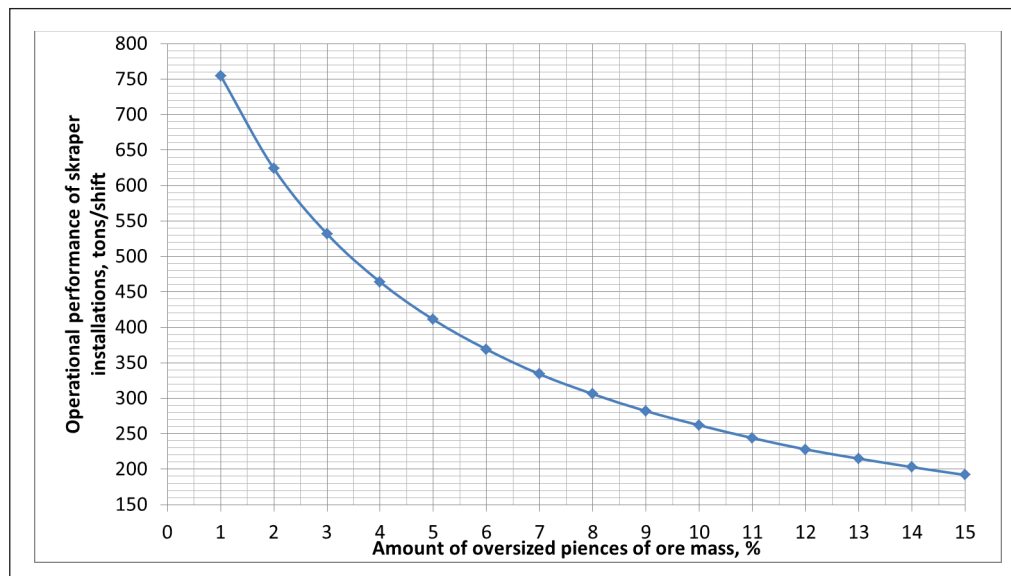


Fig. 1. Dependence variable operating performance scraper installations from the exit of oversized pieces of ore mass (%)

[11]. Which mainly arise from the exit of oversized pieces of ore or waste rock [11;12].

Formulation of the problem. To improve the combined method of ore mass delivery by increasing the productivity of the scraper winch. To do this, it is necessary to find the possibility of reducing the average length of ore mass delivery and reducing the amount of localization of hangings in the draw-points.

Presentation of the main material and results. To reduce the average length of ore delivery to 6 m, the use of a multi-bucket scraper winch is suggested [13]. But still the main task is to reduce the number of out-of-gauge pieces of ore and waste rock. Thus, according to the formula given in [4], the operating capacity of the scraper winch 55LS-2S was calculated, with a tail scraper with a volume of 1,2 m³, depending on the exit of the oversized pieces (Figure 1).

Thus, it can be seen from Figure 1 that an exception to the maximum value of the exit of oversized pieces will ensure an increase in the productivity of a scraper winch by 2–4 times.

The first step in the solution of the problem is to replace the draw-points with a diameter of 1.5 m to the niches or ore drawing with the size of 2×2 m. This will reduce the number of localization of hangings by 2,0–2,5 times. But the most effective way to reduce the output of oversized pieces is to improve drilling and blasting operations.

During the study found that the quality of the blasted rock mass depends on such factors: the influence of gravitational and tectonic stress fields, which leads to a deterioration of the situation and mine tech-

nic causes an increase in consumption of explosives in the breaking of using known short-delay blasting circuits; the nature of stratification of rocks, which affects the speed of propagation of elastic waves, under the influence of which the medium is deformed and destroyed; of the means of drilling of blast holes, parameters and methods of blasting.

On the basis of investigations carried out to solve the problems of regulating the quality of crushing rock explosion resource it was developed technological scheme of the process of breaking the ore excavation units in the array embodiments of sublevel caving in difficult geological and mining conditions of deep horizons of mines complex, including: select the direction of the main group of holes, taking into account the regularities of formation stress fields in the zone horizons stopping, their changes and zoning arrays excavation units and structural elements of the system in the process of development of mining operations; reducing the seismic effect of breaking the bottom of the complex workings of excavation units due to account of the orientation of sets of wells with respect to the bottoms of the excavation units; improving the quality of ore crushing due to the choice of the optimal length of blast holes and applied geotechnics; selection of management sets the direction of blast holes and blasting parameters taking into account the anisotropy of the ore massif.

Thus, these recommendations will allow to reduce the output of oversized pieces to 1,4–2,2% and thereby increase the productivity of the scraper winch to 600–700 t/shift (Figure 1).

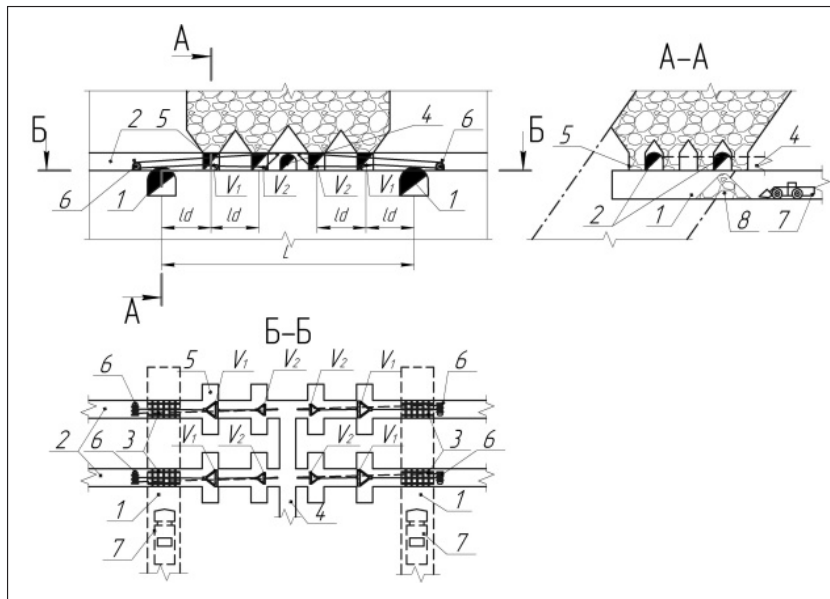


Fig. 2. Scheme of the combined method of delivery of ore mass “multi-bucket scraper winches – self-propelled loading and unloading machine”

The conducted researches and formulated recommendations made it possible to develop a fundamentally new design of the combined method of ore mass delivery (Figure 2).

To ensure the operation of the scheme shipping ore mass, the level is divided into several sublevel approximately equal height at which and foot wall roadway with the bottom layer cutting load-delivery cross drift 1. Over the load-delivery cross drifts 1 cutting roadway 2 of horizon primary delivery, combining their roof and foot wall, respectively. In the field of combining these workings is set grating 3. Pairs form a 4–6 discharge niches 5 that have a size of 2×2 m in the roadway 2 of horizon primary delivery. Will increase conditioned piece of 600 mm. The roadway 2 of horizon primary delivery in the central part combine with each other using ventilation cross drift 4 connecting system of mining ventilation drifts collective-collector.

Production and delivery of ore mass within the cleaning panels made after vidbiyky ore mass of discharge niches 5 to roadway 2. Ore delivered multi-bowl scraper settings 6, on both sides of the ventilation cross drift 4, their intersection with loading and load-delivery cross drift 1 where it grating by 3 grid unloaded. On the soles of cargo load-delivery cross drift 1, thus formed bulk ore mass 8, the amount of which can reach the order of 90 tons. The automated high-performance production of ore ensured that each quantity scrapers scraper setting 6 corresponds to the number of pairs of exhaust openings 5 of which held output, volume scrapers (V), starting with the tail, twice the previous volume ($V_1 = 2V_2$). The distance

between the scrapers same and the distance between adjacent discharge niches (ld) and center loading and load-delivery cross drift 1. This combination of discharge niches and scrapers setting will ensure uniform ore output equal doses of each outlet and help eliminate the social factor subject planogram production. Thus the average length delivery reduced to the distance between the discharge niches, which is 6 m, depending on the parameters of sustainability ore array and intensity of cleaning processes remove. As a result, productivity scraper installation is provided in the range of 600 to 700 tons/shift, causing the intensity of working panels in a range of 5,5–6,2 tons/m² per day. Depending on the distance (ld) and the number of pairs discharge niches through the wall roadway on the horizon, the primary delivery, distance between loading and load-delivery cross drifts L will fluctuate within 30–35 m. The secondary self-propelled load-delivery machines 7, carried out on load-delivery cross drifts 1 to include discharge directly into vehicles or major ore pass.

Airing horizon secondary delivery propelled loading and delivery machines, depending on the capacity of ore deposits can be made using forced local ventilation fans, or using the ventilation openings in the bottom layer of or put rocks in which it is placed. Airing horizon primary winches delivery unit 6 made clear jet of air that comes from the roadway 2 on each side panel cleaning and removal of exhaust air through the ventilation crosses 4.

This ore drawing method excludes the impact of social factors in the performance of planogram ore

drawing, through the use of multi-bucket scraper winch. Since the distance between adjacent scraper winch buckets equal to the distance between the pairs of draw-points from which the ore drawing.

The use of multi-bucket scraper winches allows the ore drawing all the draw-points along the length of the primary mine working uniform dose delivery («linearly alternating with a uniform dose of ore drawing») that improves the quantitative and qualitative of ore extraction. Because based on laboratory studies conducted for the terms of the range of tilt angles of one of the side walls panel stope of ore deposits within 35–65° and height of the layer of ore collapsed draw-points, which in scale modeling is 40 m, it was found that “linearly alternating with a uniform dose of ore drawing” reduces the ore to 10,5% in fact pure ore extraction, depending on the angle and height of the ore deposit ore collapsed layer, as compared to a uniformly consistent ore-release mode.

Conclusions. The research helped to establish optimal parameters of the technological process of ore drawing and delivery of ore mass within the panel, which will allow to provide its high-intensity of ore drawing in the range of 5,5–6,2 tons/m² per day. This indicator of intensity is ensured by

the productivity of the scraper winch at the level of 600–700 tons/shift, on the horizon of the primary delivery along the line of scraper drift, provided that the oversized pieces of the ore mass are released in the range of 1,4–2,2%. The performance of the TORO 400E self-propelled loading and unloading machine, within an average delivery length of 90–110 m, ranges from 1200–1400 tons/shift, which allows one machine to service two scraper covers in two loading crosscuts that are located along the contour of the cleaning panel. The distance between the capalores passes will be, on average, 330 m, with an average thickness of the ore deposit of 20–30 m. The combination of the roof of the loading and unloading crosscut and the soles of the scraper drift can increase the amount of invasion of the ore mass on its sole, as a result of increasing its height, which will increase the coefficient the use of a self-propelled loading and unloading machine in time for a change, in case of possible technological downtime of one of the scraper units. On the horizon of the primary scraper delivery, through-air ventilation of fresh air jets of scraper drift, which will ensure high-quality sanitary and hygienic working conditions of the driver of the scraper winch.

References:

1. Ступнік М.І., Калініченко О.В., Калініченко В.О. Техніко-економічне обґрунтування доцільності застосування самохідної техніки на шахтах Кривбасу. Науковий вісник Національного гірничого університету. 2012. № 5 (131). С. 39–42.
2. Кудрявцев М. И., Басов А. М. Пути совершенствования технологи подземной разработки богатых руд Кривбасса. Вісник КНУ: збірник наукових праць. 2010. Вип. 26. С. 23–26.
3. Дослідження та удосконалення технології відпрацювання покладів з застосуванням самохідної доставочної техніки / В.О. Калініченко, Н.Ю. Швагер, С.М. Чухарев та ін. Гірничий вісник: науково-технічний збірник. 2015. Вип. 99. С. 100–104.
4. Підвищення ефективності технологічного процесу випуску і доставки руди на базі використання самохідної навантажувально-доставочної техніки / М.І. Ступнік, В.О. Калініченко, В.М. Тарасютін та ін. Вісник КНУ: збірник наукових праць. 2016. Вип. 41. С. 141–146.
5. Brown E. T. Block Caving Geomechanics. Queensland, 2002. 515 p.
6. Chitombo G.P. Cave mining – 16 years after Laubscher’s 1994 paper Cave mining – state of the art: Proceedings of the second International Seminar on Block and Sublevel Caving (Caving 2010), (Perth, Australia, 20–22 April 2010). Perth: Centre for Geomechanics, 2010. P. 45–61.
7. Проект № 148–20–11 нарезных и очистных работ в блоке 140–147 оси гор. 1220 м в п/эт. гор. 1265/1190 м зал. «Основная» п. ш. «Большевик» (с применением самоходного оборудования) // ПАО «Кривбассжелезорудком», шахта «Октябрьская». Кривой Рог. 2011.
8. Пояснительная записка к проекту № 40 от 21 ноября 2011 г. нарезных и очистных работ в экспериментально-промышленном блоке 93–102 оси гор. 1350–1275 м по залежи «102–5» 6-го простирания 1,2 р. т. с применением самоходной техники // ПАО «Кривбассжелезорудком», шахта им. В.И. Ленина. Кривой Рог. 2011.
9. Косенко А.В., Мурашкін А.В. Дослідження та удосконалення технологічного процесу випуску і доставки руди на базі використання самохідної навантажувально-доставочної техніки. Бъдещите изследования – 2016: материалы за XII Международна научна практична конференция (Болгария, София, 15–22 февруари 2016). София: ООД «Бял ГРАД-БГ», 2016. Том 11. С. 25–31.
10. Комбінований спосіб доставки руди при відпрацюванні потужних рудних покладів / Д.Ф. Зенюк, В.М. Тарасютін, О.Я. Хівренко, М.Б. Федько. Вісник КНУ: збірник наукових праць. 2012. № 29. С. 20–25.
11. Кудрявцев М.И., Гайдуков В.С. К вопросу о путях снижения выхода негабаритных фракций обрешенной руды при подземной разработке богатых руд Кривбасса. Сталий розвиток гірничо-металургійної

промисловості: матеріали Міжнародної науково-технічної конференції (Україна, Кривий Ріг, 25–28 травня 2011 р.). Кривий Ріг: КТУ, 2011. С. 25–26.

12. Письменный С.В. Отработка сложноструктурных залежей богатых руд камерными системами разработки. Гірничий вісник: науково-технічний збірник. 2014. Вип. 97. С. 3–6.

13. Комбінований спосіб доставки рудної маси при підземній розробці крутоспадних потужних рудних покладів: пат. 105304. Україна: МПК E21C 41/00. u 2015 09471; заявл. 01.10.2015; опубл. 10.03.2016. Бюл. № 5.

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИПУСКУ І ДОСТАВКИ РУДНОЇ МАСИ В ПРОЦЕСІ РОЗРОБКИ ПОКЛАДІВ ПРИРОДНО-БАГАТИХ ЗАЛІЗНИХ РУД НА ЗНАЧНИХ ГЛИБИНАХ

У статті наведено дослідження технологічних рішень щодо підвищення інтенсивності випуску руди, які дозволять покращити повноту вилучення відбитої руди й якість рудної маси. Встановлено, що одним із ключових рішень цієї проблеми є застосування комбінованого способу доставки руди і рудної маси за допомогою комплексу «багатоковшеві скреперні лебідки – самохідна навантажувально-доставочна машина». Тому що застосування даного комплексу найбільш адаптоване до складних геомеханічних умов глибоких горизонтів шахт Кривбасу. Наведено дослідження і технологічні рішення щодо зменшення кількості локалізації зависань рудної маси в дучках до 1,4–2,2%, що дозволить підвищити експлуатаційну продуктивність скреперної лебідки до 600–700 т/змін. А також сприятиме підвищенню інтенсивності технологічного процесу випуску руди з 1,5 до 5,5–6,2 т/м² на добу, а отже, вилученню чистої руди до 10,5%.

Ключові слова: глибокі горизонти, інтенсифікація гірничих робіт, показники вилучення, природно-багаті залізні руди, самохідна навантажувально-доставочна техніка, комбінований спосіб доставки руди.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ВЫПУСКА И ДОСТАВКИ РУДНОЙ МАССЫ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ЗАЛЕЖЕЙ ПРИРОДНО-БОГАТЫХ ЖЕЛЕЗНЫХ РУД НА БОЛЬШИХ ГЛУБИНАХ

В статье приведено исследование технологических решений по повышению интенсивности выпуска руды, что позволит увеличить полноту извлечения отбитой руды и качество рудной массы. Установлено, что одним из ключевых решений этой проблемы является применение комбинированного способа доставки руды и рудной массы с помощью комплекса «многоковшовые скреперные лебёдки – самоходная погрузочно-доставочная машина». Так как применение данного комплекса наиболее адаптировано к сложным геомеханическим условиям глубоких горизонтов шахт Кривбасса. Приведены исследования и технологические решения по уменьшению количества локализации зависаний рудной массы в дучках до 1,4–2,2%, что позволит повысить эксплуатационную производительность скреперной лебёдки до 600–700 т/смену. А так же даст возможность увеличить интенсивность технологического процесса выпуска руды с 1,5 до 5,5–6,2 т/м² в сутки и, в результате, извлечение чистой руды до 10,5%.

Ключевые слова: глубокие горизонты, интенсификация горных работ, показатели извлечения, природно-богатые железные руды, самоходная погрузочно-доставочная техника, комбинированный способ доставки руды.

УДК 622.17:504.064.4

Мнухін А.Г.

Запорізька державна інженерна академія

Мнухіна Н.О.

Запорізька державна інженерна академія

Гітуляр А.А.

Запорізька державна інженерна академія

ПРИСТРІЙ ВПЛИВУ НА ПОРИСТЕ СЕРЕДОВИЩЕ ПОРОДНИХ ВІДВАЛІВ

Розглянуто та проаналізовано різні методи і прилади щодо впливу на породні відвали вугільних шахт. Зазначено основні недоліки застосовуваних зараз технологій, намічені шляхи оптимізації цих процесів. Розроблено нове обладнання для впливу на пористе середовище, що дозволить екологічно чистим шляхом виконувати переробку породних відвалів. Така переробка породних відвалів під нуль дозволить отримати багато дуже цінних компонентів. Відстежується зменшення негативного навантаження на екологічне середовище відповідних районів.

Ключові слова: пористе середовище, електрогідравлічний вплив, породні відвали, рідкоземельні елементи, екологічне середовище.

Постановка проблеми. Питання безвідходного виробництва або хоча б зниження темпів накопичення відходів гірничої промисловості на земній поверхні мають глобальний характер і пов'язані з необхідністю розроблення та трансформації промислового обладнання для їх подальшого перероблення [1]. Цим питанням присвячені теоретичні та прикладні дослідження, в яких представлені результати експериментів фахівців різних наукових напрямів. Водночас запропоновані рішення зводяться до комплексного перероблення наявних породних відвалів і перебувають у межах технічних можливостей сучасного виробництва, наявності інвестицій і економічної доцільності масштабної утилізації вторинних ресурсів у промислових умовах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Варто зазначити, що питання раціонального використання відходів вуглевидобутку й еколого-економічна оцінка наслідків їх залучення в господарський обіг розглядалися в роботах професора Н.Л. Недодаєвої [2], академіка А.І. Амоши [3], проте не приділялося достатньої уваги еколого-економічній стратегії розвитку вугледобувних підприємств. Питання екологізації процесів вуглевидобутку також розглядалися в роботах професорів В.І. Саллі [4] і А.В. Бардася [5]. У праці

професора А.Г. Вагонової [6] вивчені особливості формування і використання ресурсного потенціалу промислових відходів роботи вугільних шахт в умовах реструктуризації національної вугледобувної промисловості.

Постановка завдання. Метою роботи є створення обладнання нового покоління для забезпечення відбору проб для аналізу складу породних відвалів екологічно чистим способом.

Виклад основного матеріалу дослідження. Сьогодні місця інтенсивного розвитку вугільної промисловості класифікуються як зони підвищеної екологічної небезпеки. Одним із головних її складників є відвали гірських порід, які десятиліттями утворювалися в безпосередній близькості від основного виробництва. У даний час вони виділяють в атмосферу до 70 тис. т шкідливих речовин на рік. Відомо, що терикони мають площу майже 165 тис. га, що становить 2,5% території України. За даними Інституту екологічної гігієни і токсикології України, щорічно на кожного українця припадає виділення понад 95 кг шкідливих речовин. У зв'язку з діяльністю вугледобувних підприємств екологічне навантаження на біосферу Донбаського регіону найбільше в Європі. Отже, сотні шахт є основним джерелом руйнування і погіршення навколишнього середовища.

За останні 15 років багато шахт вже припинили свою діяльність або були призначені для закриття. Багато шахт припиняють роботу передчасно: до повного виробітку вугільних запасів і без розроблення необхідних планів щодо закриття, які враховували б питання безпеки, екологічної та соціальної відповідальності [7]. Також невирішеним залишається питання технологічних відходів вугледобувних і вуглепереробних підприємств.

Породний відвал «зі стажем» – це не тільки джерело екологічних проблем, а й природна збагачувальна фабрика для отримання цілого набору природних елементів. Водночас перероблення, використання або утилізація породи дозволить звільнити значну площу земної поверхні, отримати сировину для подальшого використання в будівництві, а також поліпшити стан навколишнього середовища [8]. Рівень небезпеки, яку несуть відходи гірничодобувних підприємств, можна істотно знизити їх переробленням або використанням у певних технологічних циклах. Перероблення териконів дозволить отримати вугільний концентрат, який можна використовувати у виробничих процесах. Крім того, відомі технології вилучення кольорових і благородних металів із шахтних відвалів. В Україні розробляються технології отримання алюмінієвих сплавів із породних відвалів, що має велике значення, тому що в шахтних териконах зміст алюмінію досягає 18–25%.

Вчені Макіївського державного науково-дослідного інституту зробили висновок про можливість вилучення з породи мінералів заліза: у процесі електромагнітної сепарації вони витягуються майже цілком. Породна маса відвалів шахт Донбасу може містити від 10 до 46% вугілля, до 15% глиноземів і до 20% оксидів кремнію і заліза. За власними даними, вміст рідкісноземельних елементів в 1 т породи такий: германію – 55 г, скандію – 20 г, галію – 100 г. Відомо, що скандій доцільно видобувати від 10 г на тону. Загальна ж кількість рідкоземельних елементів у відвалах може становити до 230–260 г/т. Але не всі породні відвали ідентичні і можуть бути джерелом виділення корисних компонентів або ж нести явну екологічну загрозу.

Відходи вугледобувних і вуглепереробних підприємств, багато з яких сформовані ще на початку минулого століття, мають різний склад і протягом десятків років піддавалися фізико-хімічним перетворенням. Їх не можна розглядати як скупчення гірської маси із властивостями і складом, характерними для первинно видобутого матеріалу. Сьогодні необхідні додаткові дослідження і випро-

бування кожного породного відвалу. Вивчення будь-якого з них потребує індивідуального підходу, що враховує місцерозташування, умови формування, стан та інші чинники. Щоб однозначно оцінити можливість перероблення породи і придатність останньої для промислового використання, необхідно детально вивчити склад терикону і подальші дослідження отриманих проб.

Для всебічного дослідження породних відвалів рекомендується проведення такого комплексу робіт:

1. Збирання даних з історії формування відвалу і геологічної документації. Передбачається отримання інформації, з якої можна зробити висновок про співвідношення порід, які потрапили у відвал за весь період його існування. Це можуть бути геологічні розрізи під час розтину виробок, геологічні замальовки, укладення про проведення капітальних гірничих виробок тощо.

2. Попереднє вивчення складу породних відвалів за заданою схемою та відбір характерних зразків. Отримання даних про наявність того чи іншого корисного компонента згідно з даними мікроскопічних досліджень і результатів випробування. Розбракування відвалів за перспективністю подальшого використання. Оцінка показності розвідувальних виробок і обсягів валових проб.

3. Оцінка і випробування перспективних відвалів, проведення комплексу досліджень і оброблення отриманих даних, складання докладного звіту з описом і характеристикою досліджуваного породного відвалу.

Для відбору проб для подальшого докладного аналізу пропонується технічне рішення, яке стосується пристроїв, що перетворюють енергію, накопичену в електричних конденсаторах електрогідролічної установки, на енергію дугового розряду, здатного виконувати корисну роботу, наприклад, руйнування породних відвалів (териконів) вугільних шахт, відвалів золи – винесення теплових електричних станцій, тобто всіляких пористих вихідних матеріалів.

Відома електрогідролічна установка для руйнування гірничих порід, яка містить генератор імпульсів енергії, циліндричний корпус із розміщеними в останньому відкритими розрядними камерами, в кожній з яких встановлена пара легкоплавких електродів із міжелектродним проміжком, водночас пара електродів приєднана до генератора імпульсів паралельно, а міжелектродні проміжки в кожній камері різні за довжиною [9].

Основними недоліками відомого технічного рішення є те, що, по-перше, необхідна точна

установка розрядних проміжків в камерах, а по-друге, камери для виключення взаємовпливу однієї пари електродів на іншу мають розташовуватися на визначеній відстані одна від одної. Крім того, електрод має встановлюватися у свердловині, ємності, шпурі, в який можна налити воду, тому згадана вище конструкція не придатна для вирішення поставленої задачі, тобто безпосередньо для установки в пористе середовище.

Відома електродна система для руйнування гірничих порід, яка містить коаксіально встановлений центральний стрижневий електрод, зовнішній трубчастий електрод і діелектричний компаунд, розміщений між електродами, а також додатковий легкоплавкий електрод у вигляді циліндричної спіралі, розміщений в нетермостійкому діелектричному компаунді [10]. Недоліками такого технічного рішення є те, що за загальної стабілізації роботи електрода (не потрібне точне встановлення кожної пари електродів після кожного розряду), конструкція проте не може бути застосована за необхідності руйнування пористого матеріалу, наприклад, відвалів та ін.

На рис. 1 показаний розріз розробленого робочого органу, який містить коаксіально розташований позитивний електрод 1, негативний електрод 2, розділені нестійким термічним компаундом 3. Система електродів поміщена в кожух 4, виконаний з ізоляційного матеріалу зі слабкими механічними властивостями, наприклад, поліетилену, який закріплюється на негативному електроді 2 за допомогою ізоляційного манжета 5, утворюючи герметично замкнутий простір 6, заповнений робочою рідиною, наприклад, водою. Позитивний електрод 1 з'єднаний із «плюсом» електрогідравлічного комплексу 7, а негативний електрод 2 з'єднаний із «мінусом» того ж комплексу 7.

Працює запропонований пристрій так. Напряг від генератора 7 подається на робочий орган (рис. 1) [11]. На кінцях електродів 1 і 2, поміщених у рідке середовище в кожусі 4, виникає потужна електрична дуга, що являє собою підводний електричний вибух, вода миттєво випаровується, водночас виникає зона високого тиску (20–30) тис. атм., що руйнує кожух 4 (може бути виконаний із поліетилену) і впливає на середовище, що оточує робочий орган, виконуючи тим самим корисну роботу. Оскільки робоча рідина постійно перебуває навколо електродів, то весь виріб може працювати в пористому середовищі, де в іншому разі виник би безперервний витік рідини, внаслідок чого електрогідравлічний процес виявився б неможливим.

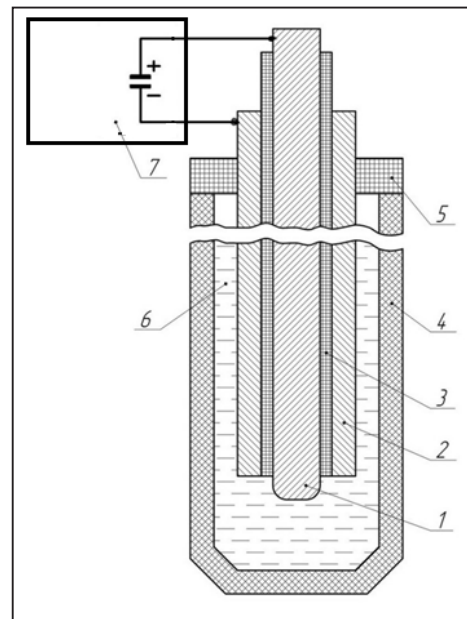


Рис. 1. Робочий орган для електрогідравлічного впливу на пористе середовище

Можливий і другий варіант реалізації створеного пристрою, за якого як робоча рідина використовується розчин так званої рідкої вибухівки, наприклад, калієвої селітри KNO_3 . У цьому варіанті за температури електричної дуги $20 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}$ відбувається займання селітри, що супроводжується потужним додатковим вибуховим впливом, причому зауважимо, що без високої температури, що виникає в результаті електрогідравлічного впливу, KNO_3 цілком безпечна.

Висновки. З усього вищезазначеного випливає, що породні відвали вугледобувних та вуглебагачувальних підприємств необхідно сприймати не як безликі відходи, а як об'єкти з перспективою вивчення і подальшого перероблення для використання, завдяки чому можна істотно знизити негативне навантаження на екологію відповідних промислових районів. Це дозволить у майбутньому уникнути багатьох проблем, пов'язаних зі здоров'ям людей і екологічною безпекою; мінімізувати соціальні й економічні наслідки ситуації, що склалася; захистити навколишнє середовище і ресурси від фізичного і хімічного руйнування.

Питання доцільності та важливості проблеми перероблення та цілковитої утилізації відходів вугледобувної галузі є очевидним і гострим, але дотепер залишається відкритим. Як показує досвід, без підтримки держави і зацікавленості з боку підприємців та інвесторів освоїти цей новий і досить ризикований, але водночас перспективний напрям, досить складно.

Список літератури:

1. Горная энциклопедия. Т. 2: Советская энциклопедия. Москва, 1986. 576 с.
2. Недодаева Н.Л. Эколого-экономическая политика природопользования в условиях специфики горного производства: монография / под ред. Н.Л. Недодаева, Институт экономики промышленности НАН Украины, Донецк, 2006. 356 с.
3. Амоша О.І. Проблеми реструктуризації промисловості в контексті сталого розвитку. Проблеми сталого розвитку України. 1998. С. 344–353.
4. Салли В.И., Вагонова А.Г., Райхель Б.Л. Особенности инвестиционной политики в угольной промышленности. Проблемы развития внешнеэкономических связей и привлечения иностранных инвестиций: региональный аспект. 2003. С. 392–396.
5. Бардась А.В. Розробка методичних рекомендацій щодо визначення економіко-екологічного потенціалу вугільних шахт / за ред. А.В. Бардась. Економічний простір: зб. наук. праць. № 37. Хмельницьк, 2010. С. 309–322.
6. Вагонова О.Г. Управління ресурсним потенціалом вугільних шахт: навч. посібник / за ред. О.Г. Вагонова, Ю.С. Папіж. Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2013. 178 с.
7. Пек Ф. Оценка рисков в Донецком бассейне. Закрытие шахт и породных отвалов. Киев, 2008. 171 с.
8. Леонов П.А., Сурначев Б.А. Породные отвалы угольных шахт. Москва, 1970. 112 с.
9. Электрогидравлическая установка для разрушения горных пород: авторское свидетельство № 1136527: бывш. СССР, Е 21638/18.
10. Электродная система для разрушения горных пород: авторское свидетельство № 1297553: бывш. СССР, Е21С37/18.
11. Робочий орган для електрогідравлічного впливу на пористе середовище: патент № 120332, Україна: МПК (2017.01) Е 21В 7/00, Е21С 45/00. № 2017 04976, заявл. 22.05.2017, опубл. 25.10.17. Бюл. № 20. 5 с.

УСТРОЙСТВО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПОРИСТУЮ СРЕДУ ПОРОДНЫХ ОТВАЛОВ

Рассмотрены и проанализированы различные методы воздействия на породные отвалы угольных шахт и предназначенное для этого оборудование. Указаны основные недостатки применяемых в настоящее время технологий, намечены пути оптимизации этих процессов. Разработано новое оборудование для влияния на пористую среду, что позволит экологически чистым путем перерабатывать породные отвалы. Такая переработка породных отвалов под ноль позволит получить много очень ценных компонентов. Наблюдается уменьшение негативной нагрузки на экологическую среду соответствующих районов.

Ключевые слова: пористая среда, электрогидравлическое влияние, породные отвалы, редкоземельные элементы, охрана окружающей среды.

THE DEVICE FOR IMPACT ON THE POROUS MEDIUM BREED DUMPS

Various methods and equipment of impact on rock dumps of coalmines are considered and analyzed. The main short comings of the currently used technologies are indicated, and ways of optimizing these processes are outlined. A new equipment for influencing the porous medium has been developed, which will allow for environmentally friendly processing of waste dumps. Such processing of waste dumps under a zero will give a lot of very valuable components. The decrease in the negative impact on the ecological environment of the relevant are as is monitored.

Key words: porous medium, electro hydraulic influence, rock dumps, rare earth elements, environmental protection.

УДК 622.271.46

Слободянюк В.К.

Криворожский национальный университет

Слободянюк Р.В.

Криворожский национальный университет

АНАЛИЗ И РАЗРАБОТКА СХЕМ КАРЬЕРНЫХ НАКЛОННЫХ ПОДЪЕМНЫХ УСТАНОВОК

В статье выполнен анализ основных схем карьерных наклонных подъемных установок. Для снижения в транспортном цикле автосамосвалов потерь времени, связанных с холостым пробегом, предложено использовать карьерные наклонные установки для спуска в карьер порожних автосамосвалов. Обосновано, что в качестве подъемных машин в карьерных установках рационально использовать машины с цилиндрическим барабаном. Выполнена конструкторская проработка и определены параметры подъемной машины с полиспастной подвеской одной платформы для спуска автосамосвалов. Предложены новые технические решения для подъемных машин с двумя платформами, которые попеременно используются для спуска в карьер порожних автосамосвалов.

Ключевые слова: карьерная наклонная подъемная установка, холостой пробег автосамосвалов, барабанная подъемная машина, полиспастная подвеска подъемных сосудов, ресурсосберегающая технология.

Постановка проблемы. К концу XX в. был достигнут значительный прогресс в разработке и внедрении шахтных подъемных установок большой грузоподъемности. Известны примеры эксплуатации шахт глубиной, превышающей 2 000 м, грузоподъемность шахтных подъемных машин достигла 50–60 тонн и более. Успехи в разработке шахтных подъемных машин возобновили интерес к использованию крутонаклонных подъемных установок в глубоких карьерах [1–6]. В 60-е гг. в США, Южной Америке и Китае было реализовано более 10 проектов наклонных карьерных скиповых подъемников [1; 2]. В 1972 г. западногерманская компания Siemag построила единственный в СССР наклонный скиповой подъемник на Сибайском карьере [5]. Наряду с разработкой и внедрением скиповых наклонных подъемников, ряд коллективов авторов работал над идеей использования наклонного подъемника для спуска порожних и подъема груженых карьерных автосамосвалов [7–9]. Однако многочисленные проекты в этом направлении не были реализованы. Причиной этого является не только техническая сложность карьерных наклонных подъемных установок, которые должны по своим параметрам соответствовать карьерному автотранспорту, но и

сомнения в экономической эффективности такого рода установок в современном карьере. Установки, предназначенные для спуска порожних и подъема груженых самосвалов, отличаются высокой металлоемкостью и сложностью технических решений по реализации многоканатного подъема.

Результаты имитационного моделирования работы карьера с наклонной подъемной установкой для спуска порожних и подъема груженых самосвалов показывают, что в таком карьере формируются два потока автосамосвалов: от нижней разгрузочной площадки подъемника – поток порожних автосамосвалов к экскаваторным забоям, а от экскаваторных забоев – поток груженых самосвалов к нижней погрузочной площадке подъемника. Главной технологической особенностью такой схемы является возникновение с высокой вероятностью очередей порожних автосамосвалов, ожидающих спуска в карьер, и груженых автосамосвалов, ожидающих подъема из карьера. Подъемное устройство выступает в роли ограничивающего перегона. В немногочисленных работах [10], анализирующих эффективность данного вида транспорта, отмечается сложность достижения и поддержания требуемого уровня производительности карьера. Использование подъемной

установки только с одной платформой для попеременного спуска порожних или груженых самосвалов изначально формирует в транспортном цикле самосвалов узкое место и обуславливает возникновение очередей. Улучшить технологические показатели открытых горных работ возможно за счет строительства двух подъемных установок, но для этого потребуется вдвое больше инвестиций. Можно признать эффективным использование такого устройства в карьере с невысокой производительностью и с бортами, расположенными в крепких монолитных породах. В таком карьере размещение на его борту системы технологических автомобильных дорог будет являться фактором, увеличивающим объем вскрыши в конечном контуре карьера.

Прогресс в горном машиностроении увеличил надежность карьерных автосамосвалов и привел к увеличению рационального расстояния транспортирования горной массы. Известны примеры, когда дальность транспортирования горной массы карьерными автосамосвалами достигает 10 км и более. В таких условиях основным негативным фактором, требующим своего решения, является холостой пробег автосамосвалов. Односторонняя направленность карьерных грузов, равенство грузового и порожнего пробега автосамосвалов является главной особенностью сборочного карьерного транспорта; устранение холостых пробегов карьерного транспорта можно рассматривать в качестве основного пути повышения эффективности карьерного транспорта.

Анализ последних исследований и публикаций. Большой вклад в развитие теории наклонных карьерных подъемников внес В.И. Белобров [11; 12]. В его трудах рассмотрены многоканатные наклонные карьерные подъемники, предназначенные для спуска и подъема карьерных автосамосвалов, а также для подъема скипов грузоподъемностью 120 и более тонн. Однако основная направленность исследований была ориентирована на подъем груза на поверхность. Для решения поставленной задачи использовался многоканатный подъем с большим углом обхвата приводных шкивов ($\alpha = 3\pi$). С увеличением α тяговая способность подъемной машины повышается:

$$S_2 = S_1 e^{\alpha f},$$

где S_2 – натяжение ветви канатов, поднимающей загрузенный сосуд;

S_1 – то же со стороны порожнего сосуда;

f – коэффициент сцепления (трения) между канатом и футеровкой приводных шкивов (0,2÷0,3).

Подъемные установки с несколькими ведущими шкивами трения имеют тяговую способность в 3–6 раз большую, чем одноприводные машины. Недостатком такой установки [6] является то, что тяговые канаты подвергаются многократным (до 8–9 раз) перегибам на шкивах за подъемный цикл, причем половина из них приходится на изгибы в разных направлениях, что приводит к сокращению сроков службы канатов.

Компания Siemag разработала проект наклонного подъемника для груженых самосвалов, который оборудован одной платформой с противовесом [13]. В данной разработке также используется многоканатный подъем с большим углом обхвата шкивов трения.

В мире известно несколько примеров использования подъемников автосамосвалов при производстве горных работ в экстремальных условиях – при строительстве гидротехнических сооружений в горной местности (Nant de Drance, Tokuyama, Tateyama, Miyagase, Kaprun и др.). Грузоподъемность этих подъемников не превышает 40 тонн.

Постановка задачи. Целью работы является разработка и обоснование рациональных конструкций карьерных наклонных подъемников, использование которых обеспечит снижение холостых пробегов карьерных автосамосвалов.

Изложение основного материала исследования. Основной идеей исследования является повышение производительности карьерного автотранспорта путем снижения в транспортном цикле непроизводительных потерь времени, связанных с холостым пробегом автосамосвалов, за счет использования наклонных подъемников для спуска порожних автосамосвалов в карьер [14; 15]. Очевидно, что достичь максимального экономического эффекта могут подъемные установки, оборудованные двумя подъемными платформами, попеременно используемыми для спуска автосамосвалов.

Известно, что при вертикальном подъеме с использованием барабанных машин или подъемных машин со шкивами трения движение подъемных сосудов осуществляется в двух взаимно перпендикулярных вертикальных плоскостях: в плоскости, в которой расположен головной шкив, и в плоскости, касательной к окружности шкива (точка схода со шкива подъемного каната). Линия пересечения этих плоскостей совпадает с осью подъемного каната. При вертикальном подъеме не возникает принципиальных сложностей с созданием условий для движения в стволе двух скипов. Скипы, используемые при вертикальном подъеме, конструктивно адаптированы к перемещению

внутри ограниченного сечения шахтного ствола (высота скипа больше его размеров в плане).

Данный принцип сохраняется и при наклонном подъеме – движение подъемного сосуда осуществляется вдоль линии пересечения двух взаимно перпендикулярных плоскостей, но одна из них (касательная к шкиву) расположена под углом к горизонту. В этом случае конструкторское решение по организации движения двух подъемных сосудов (скипов или платформ), связанных с одной или несколькими подъемными машинами, является более сложным, особенно при спуске самосвалов на платформе (длина карьерного самосвала, грузоподъемностью 130 тонн, около 12 м, ширина – 6 м, вес самосвала 105 тонн, вес подъемной платформы 50 тонн). В большинстве предлагаемых наклонных подъемников самосвалов это привело к установке на копрах или в здании подъемной машины системы отклоняющих шкивов, что делает такие подъемные установки сложными и ненадежными.

Огромный вклад в развитие теории карьерных наклонных подъемных установок внес *Б.А. Носырев*. В работе [4] определено 8 базовых схем карьерных наклонных подъемных установок, дана их оценка и установлена рациональная область применения. На рис. 1 приведены принципиальные схемы карьерных наклонных подъемных установок, в табл. 1 приведен анализ этих установок.

Полное отсутствие опыта эксплуатации наклонных подъемных установок с канатопроводящими шкивами трения в условиях открытых горных работ не позволяет оптимистически относиться к возможному повышению расчетного значения коэффициента трения μ , более того, к возможному снижению коэффициента трения за счет обмерзания каната и смачивания в периоды дождей и снеготаяния [4].

С целью определения основных технических характеристик установки для спуска в карьер порожних автосамосвалов (рис. 2) была выполнена конструкторская проработка для следующих горнотехнических условий: тип подъемной установки – одноконцевая; высота подъема $H_n = 400$ м; угол наклона подъемного пути $\alpha = 40^\circ$; длина подъема $L_n = 622,48$ м; тип подъемного сосуда – транспортная платформа; грузоподъемность платформы $Q_{гр} = 105000$ кгс; масса платформы $Q_{пл} = 50000$ кг; назначение наклонного подъема – грузоподъемной.

Максимальная статическая нагрузка наклонной подъемной установки – 155 тонн. В настоящее время подъемные шахтные машины, производи-

мые промышленностью, не обладают необходимой грузоподъемностью для выполнения поставленной задачи. Предлагается схема подъемной установки с двумя синхронизированными подъемными машинами и полиспастной системой подвески грузовой платформы, что позволит уменьшить концевую нагрузку в подъемных канатах.

Концевая нагрузка составит:

$$Q_0 = \frac{Q_{см}}{n \times i_n \times \eta_n} = \frac{155000}{2 \times 2 \times 0,99} = 39142 \text{ кгс},$$

где $n = 2$ – количество подъемных канатов;

Подъемные машины по принципу действия разделяются на барабанные и со шкивами трения. Параметры крупных подъемных машин с диаметром барабанов от 4 до 6 м в советской горной промышленности были определены ГОСТом 18 115-72. Стандартизации подверглись основные параметры барабанов (диаметр и длина), передаточные отношения редукторов, величины максимального натяжения каната и разность статических натяжений канатов. Крупные подъемные машины предназначены только для установки на поверхности в закрытых помещениях. На рис. 3 приведены результаты статистической обработки параметров подъемных машин, предусмотренных ГОСТом 18 115-72. Определена зависимость максимального статического натяжения каната ($T_{ст}$, тс) и максимальной разности статических натяжений канатов ($F_{ст}$, тс) от массы подъемной машины без редуктора и электрооборудования (M , т). Анализ (рис. 3) показывает, что параметрическим рядом крупных подъемных машин предусмотрены машины с концевой нагрузкой и разностью статических натяжений 40 и более тонн.

В качестве подъемной машины рационально применить уже разработанную НКМЗ шахтную подъемную машину с одним цилиндрическим барабаном. По размерам органа навивки и концевым нагрузкам удовлетворяет подъемная шахтная машина 1-6x5,6/0,8, имеющая следующие параметры: диаметр барабана – 6 000 мм; ширина барабана – 5 600 мм; статическое натяжение каната – 560 кН; разность статического натяжения каната – 400 кН; маховый момент машины – 11 200 кНм².

Разработанная подъемная установка состоит из следующих частей:

- две однобарабанные подъемные машины типа 1-6x5,6/0,8;
- платформа для транспортировки самосвала;
- копер для размещения отклоняющих шкивов;
- два отклоняющих шкива ($\varnothing 5000$ мм);
- два наклонных рельсовых пути для перемещения платформы.

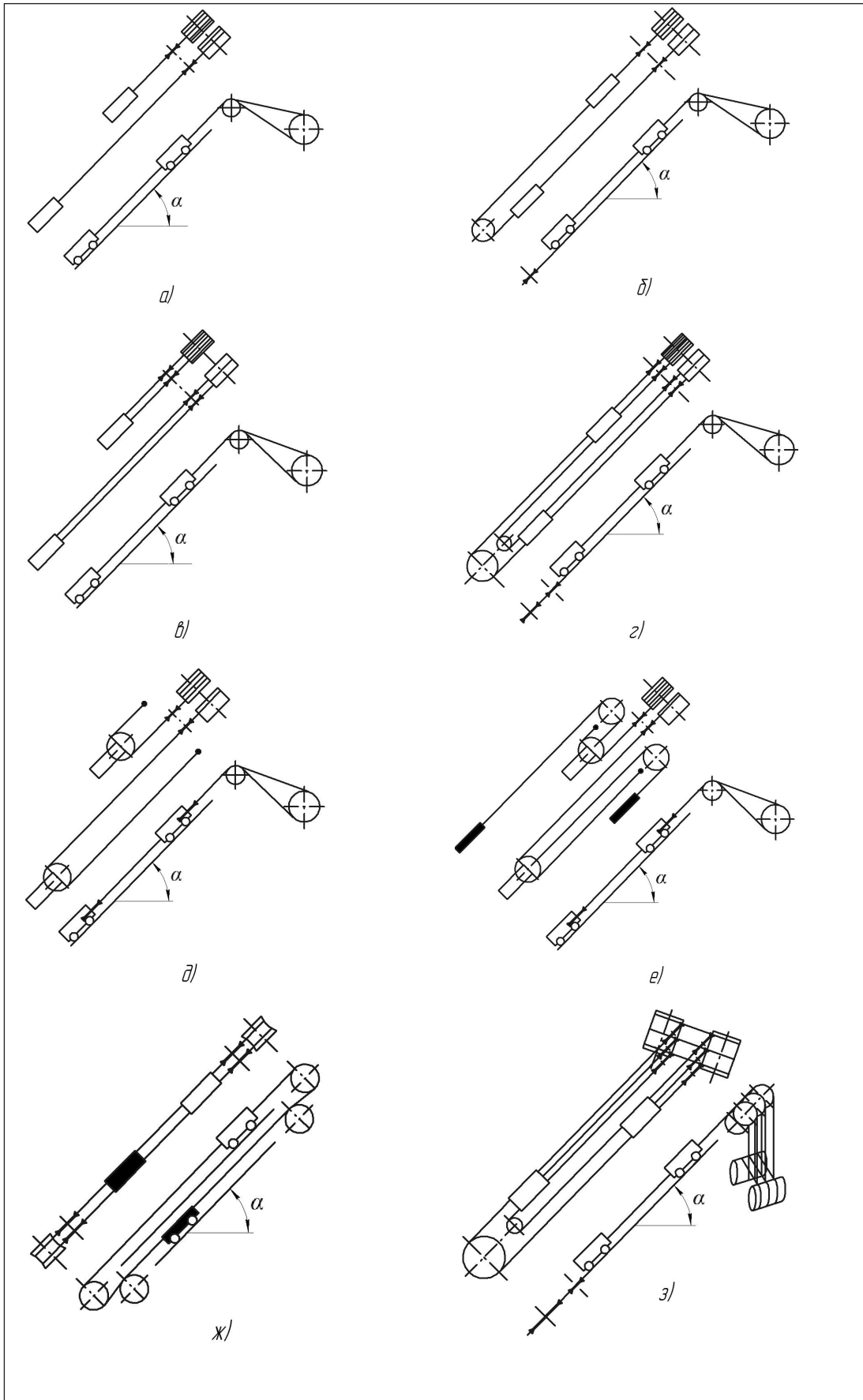


Рис. 1. Схемы подъемных установок [4]

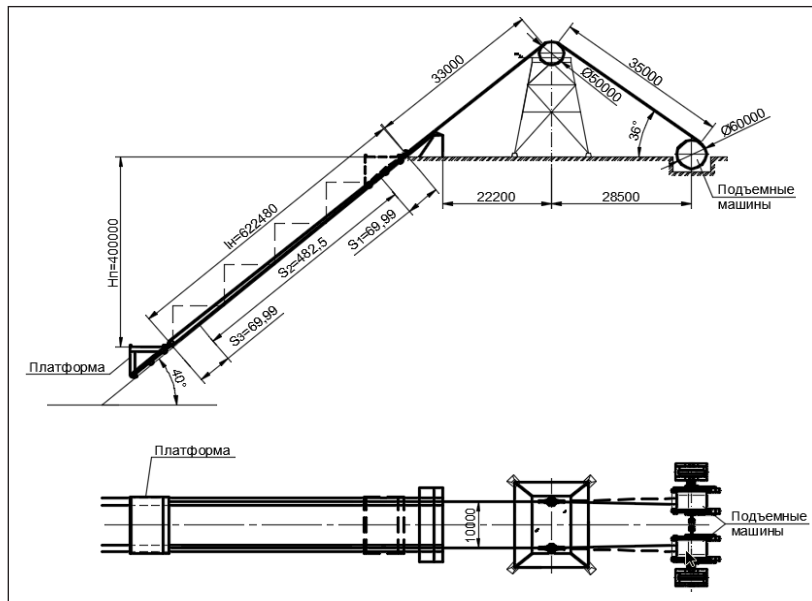


Рис. 2. Схема подъемной установки
 $i_n = 2$ – кратность полиспаста (число рабочих канатов);
 $\eta_n = 0,99$ – КПД блока полиспаста на подшипниках качения

Таблица 1

Анализ схем карьерных наклонных подъемных установок

Конструктивные особенности	Достоинства	Недостатки
Одноканатная подъемная установка с многослойной навивкой канатов на цилиндрический барабан (рис. 1а, 1б), drum hoist. Грузоподъемность до 40 тонн.	Простота и надежность устройства; возможность применения обработанных смазкой канатов.	Применение схемы ограничено тяговыми свойствами каната, статическим натяжением ветви и наибольшим статическим неуравновешенным окружным усилием. При большом неуравновешенном окружном усилии необходимо уравновесить систему подъема (рис. 1б).
Многослойная подъемная установка с многослойной навивкой канатов на секции цилиндрических барабанов (рис. 1в), Blair hoist. Грузоподъемность более 40 тонн, высота подъема более 400 м.	Простота и надежность устройства; возможность применения обработанных смазкой канатов; применение органа навивки меньшего диаметра, чем в случае канатоведущих шкивов трения; меньший расход канатов.	При подъеме груза с глубоких горизонтов улучшение энергетического эффекта может быть достигнуто за счет применения нижних уравновешивающих канатов (рис. 1г).
Подъемники с полиспастной подвеской сосудов (рис. 1д, 1е).	Устранено вредное явление неравномерного распределения усилия по ветвям каната; вследствие высокой скорости движения каната возможно применение безредукторных приводов. Применение блоковых (полиспастных) подъемников рационально для клетевых установок с небольшой скоростью подъема клетки (платформы).	Усложнение конструкции подъемного сосуда из-за размещения обводного шкива на раме сосуда, увеличение веса сосуда на 10–15 тонн; повышенный износ каната из-за удвоенной скорости его движения и дополнительного изгиба на обводном шкиве; применение канатов удвоенной длины.
Многослойная подъемная установка с канатоведущими шкивами трения (рис. 1ж, 1з), friction hoists (Коепе hoists). Грузоподъемность более 40 тонн, высота подъема более 400 м. Подъемная машина с одним ведущим шкивом трения не обеспечивает высокой тяговой способности и требует наличия уравновешивающих канатов. В машинах с несколькими ведущими шкивами трения угол обхвата приводных шкивов достигает 3л.	Возможность применения при большой длине каната; снижение инерционных масс органа навивки; повышение КПД подъемной установки; предотвращение опасности обрыва каната при сходе сосуда с рельсов (заклинивание) и переподъеме.	Ограниченность применения, обусловленная соотношениями напряжений канатов; увеличение износа и коррозии каната в связи с отсутствием защитной смазки; снижение коэффициента трения за счет обмерзания каната и смачивания в периоды дождей и снеготаяния; конструктивная сложность двухсосудных наклонных подъемных установок; нижние подвесные уравновешивающие канаты значительно усложняют конструкцию и снижают надежность комплекса подъема.

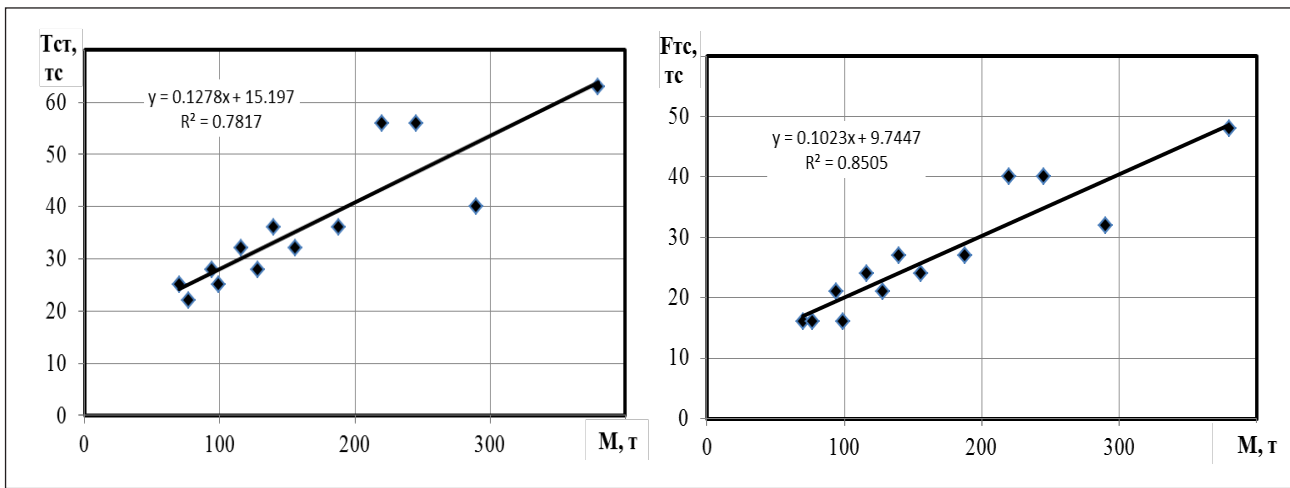


Рис. 3. Зависимость максимального статического натяжения каната (а) и максимальной разности статических натяжений канатов (б) от массы подъемной машины.

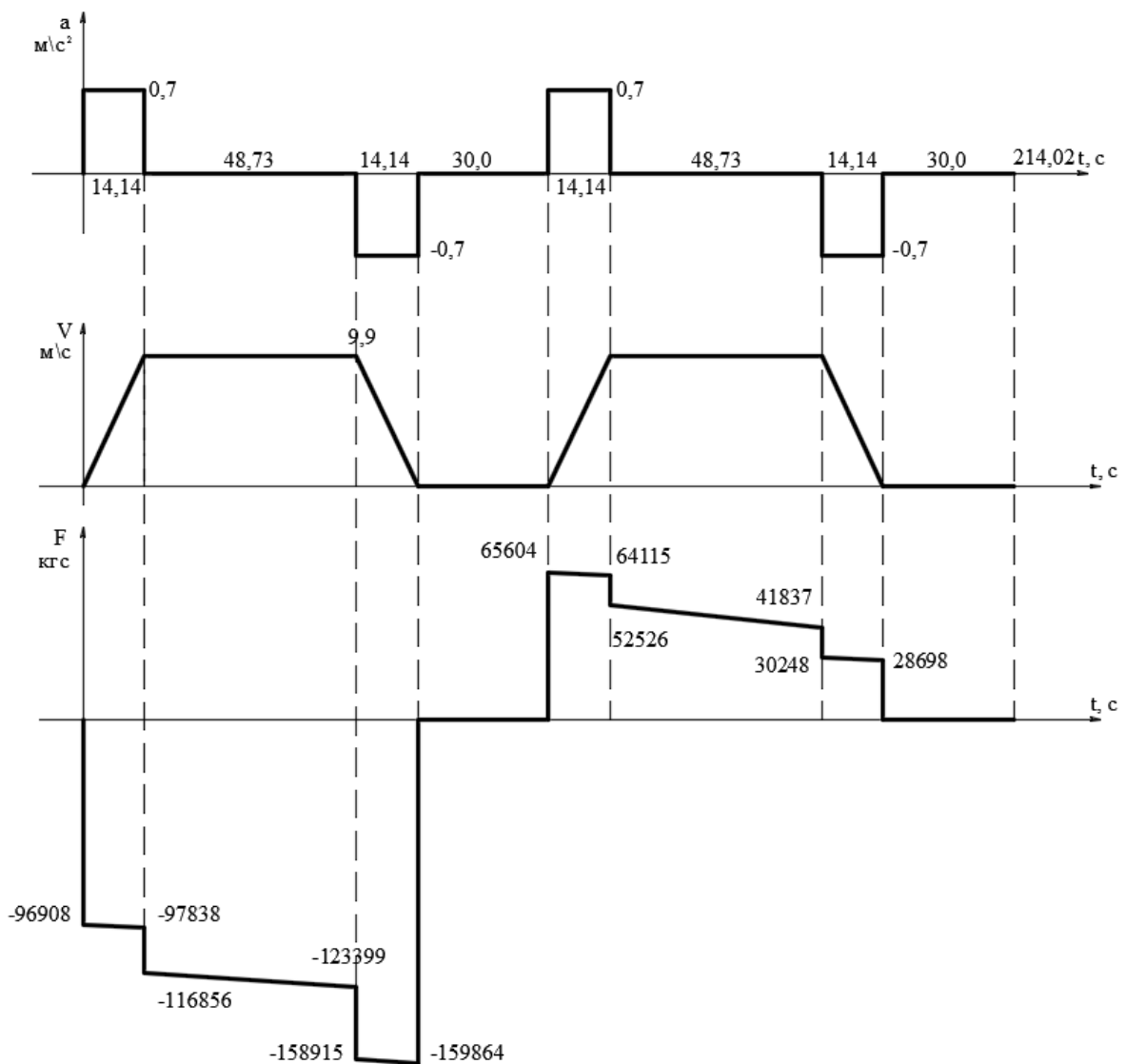


Рис. 4. Диаграммы ускорений, скоростей и усилий

Для уменьшения концевой нагрузки на подъемные канаты предусматривается применение двух подъемных машин с полиспастным креплением подъемных канатов к раме платформы. Такая схема подъемной установки позволяет применение серийно выпускаемых промышленностью подъемных машин. Для равномерного распределения нагрузки работа подъемных машин должна быть синхронизирована по скорости и усилию натяжения канатов. Параметры подъемной установки определены расчетом: скорость подъема платформы – 9,9 м/с, время одного цикла – 214,2 с, затраты времени на въезд – выезд самосвала – 60 с, количество циклов в час – 12–15. На рис. 4 приведены диаграммы ускорений, скоростей и усилий.

При спуске грузеной платформы периоды $1 \div 3$ (рис. 4) значения движущих усилий на окружностях навивки канатов подъемных машин имеют отрицательные значения, т. е. двигатели машин работают в режиме динамического торможения.

При подъеме платформы приводные двигатели работают в двигательном режиме, преодолевая статические сопротивления подъемной системы и обеспечивая при этом действительную линейную скорость при соответствующих значениях ускорений и замедлений, принятых в соответствии с требованиями норм проектирования.

Подъемная установка оснащается двумя электродвигателями П2-800-217-8СУХЛ4 с номинальной мощностью 3 150 кВт.

Эффективность технологии горных работ с использованием для спуска самосвалов в рабочую зону карьера разработанного устройства зависит от числа спусков в час. Производительность подъемной установки достаточна для обслуживания одного экскаватора с емкостью ковша 12–15 м³. При необходимости обеспечить рабочую зону карьера вдвое большим числом автосамосвалов необходимо построить в карьере два аналогичных одноконцевых подъемника или разработать

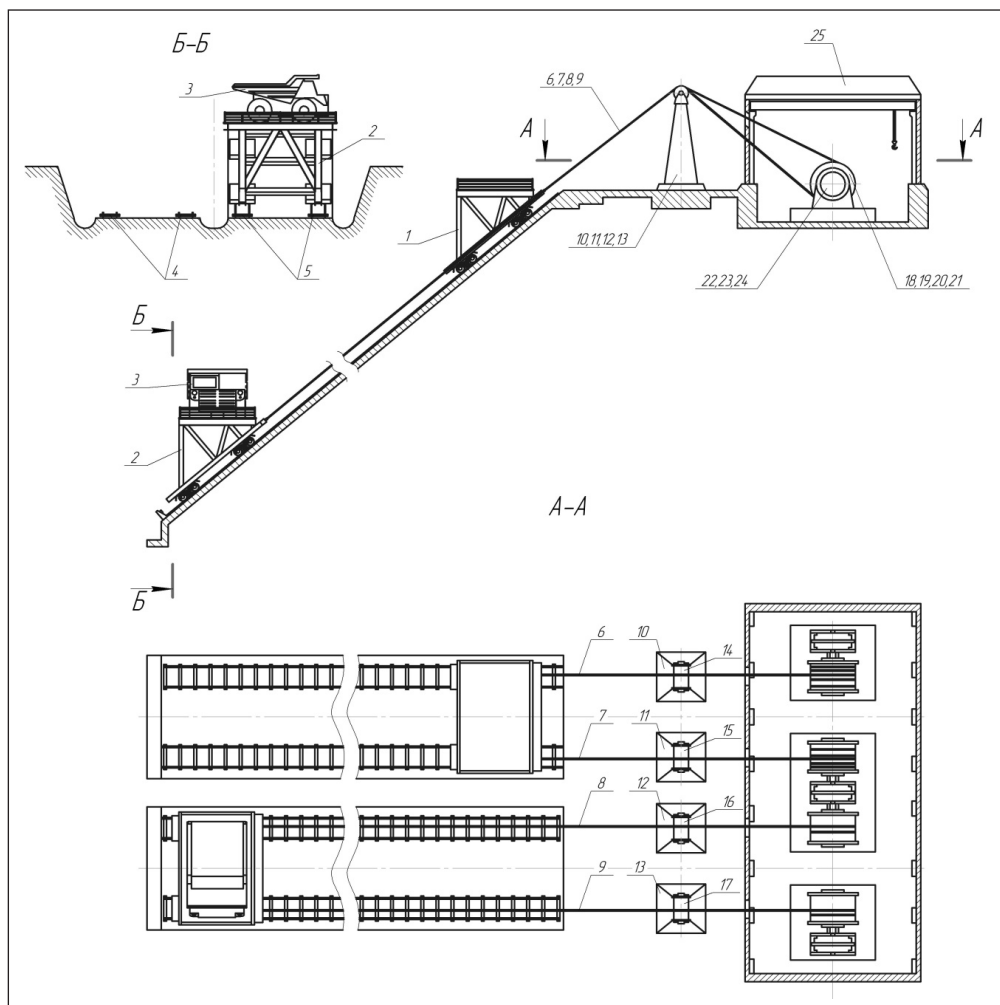


Рис. 5. Общий вид подъемной установки с односторонним расположением в плоскости борта карьера двух параллельных трасс подъемника

подъемную машину с двумя платформами. Главная идея, которую необходимо реализовать в подъемном устройстве с двумя платформами, – уравновесить подъемную систему и реализовать спуск самосвалов в карьер при работе двигателей в режиме рекуперации.

Схемы можно классифицировать по расположению трасс подъемников относительно

продольной подъемной машины и по положению трасс относительно друг друга. Сравнить достоинства и недостатки альтернативных схем подъемной установки с двумя платформами будем с двумя независимыми подъемными установками с одной платформой.

Анализ возможных кинематических схем позволил в качестве конкурентно способных

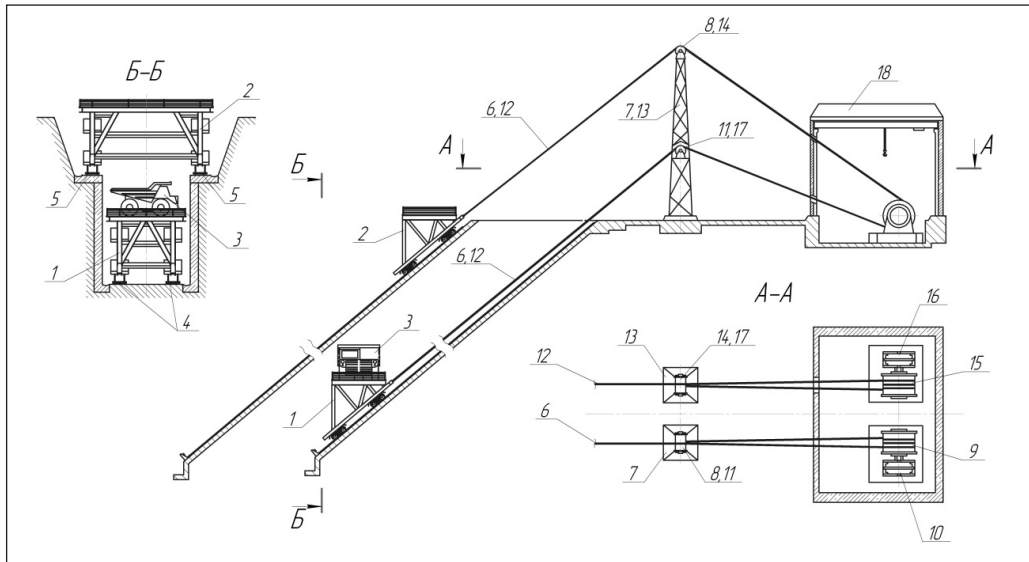


Рис. 6. Общий вид подъемной установки с односторонним расположением в вертикальной плоскости двух параллельных трасс подъемника

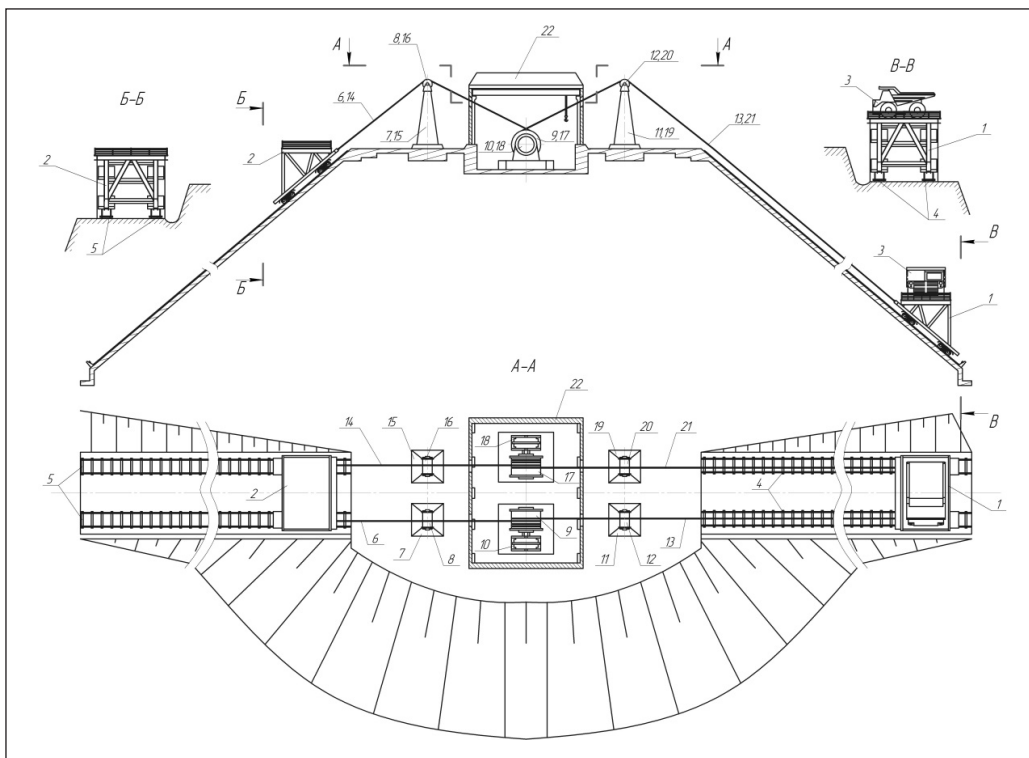


Рис. 7. Общий вид подъемной установки с разносторонним расположением в вертикальной плоскости двух трасс подъемник

назвать следующие решения. По положению относительно подъемной машины обе трассы могут быть расположены либо по одну сторону от нее (рис. 5, 6), либо на противоположные стороны от подъемной машины (рис. 7). При расположении трасс на противоположных сторонах от подъемной машины трассы располагаются в одной вертикальной плоскости, но не параллельно друг другу (рис. 7). Чтобы создать горнотехнические условия для такого расположения трасс, необходимо площадку для размещения подъемной машины расположить на целике, выступающем в плане из общего простирания борта карьера. При такой конструкции подъемной установки появляется возможность опускать самосвалы в карьер на два разных участка рабочей зоны карьера. Расстояние между внутрикарьерными площадками подъемной установки может достигать 600–800 м. При расположении трасс подъемной установки по одну сторону от подъемника они также располагаются в одной плоскости, в общем случае параллельно друг другу, но эта плоскость может быть либо параллельной плоскости борта карьера (рис. 5), либо вертикальной и проходить через копровые шкивы подъемной установки (рис. 6).

На рис. 6. приведен общий вид подъемной установки с односторонним расположением в вертикальной плоскости двух параллельных трасс подъемника (верхняя и нижняя трассы), где 1, 2 – платформы; 3 – автосамосвал; 4, 5 – железнодорожные наклонные пути; 6, 12 – подъемные канаты; 7, 13 – копры; 8, 14 – верхние копровые шкивы; 11, 1 – нижние копровые шкивы; 9, 15 – орган навивки каната; 10, 16 – электродвигатели; 18 – здание подъемной машины (отклоняющие шкивы на платформах и полиспастная система на рисунке не показаны). На рис. 7 приведен общий вид подъемной установки с разносторонним (относительно вертикальной плоскости, проходящей через продольную ось барабана) расположением в вертикальной плоскости двух трасс подъемника (условно применительно к рис. 7, левая и правая трассы), где 1 – платформа правой трассы; 2 – платформа левой трассы; 3 – автосамосвал; 4, 5 – железнодорожные наклонные пути; 6, 14, 13, 21 – подъемные канаты; 7, 15, 11, 19 – копры; 8, 16, 12, 20 – копровые шкивы; 9, 17 – органы навивки каната; 10, 18 – электродвигатели; 22 – здание подъемной машины (отклоняющие шкивы на платформах и полиспастная система на рисунке не показаны).

Схема, приведенная на рис. 5, отличается от двух независимых, рядом расположенных подь-

емников с одной платформой тем, что смежные однобарабанные подъемные машины заменены одной двухбарабанной машиной. Двухбарабанная машина обслуживает обе трассы, и все время работает в режиме рекуперации, однобарабанные подъемные машины – попеременно. В данном случае подъемная установка оснащается тремя подъемными машинами. Одним из основных недостатков этой схемы является то, что нет возможности организовать сквозное движение самосвалов, то есть при заезде на платформу или при съезде с нее самосвал движется задним ходом.

Схема на рис. 6 отличается от схемы на рис. 5 тем, что подъемные машины статически более уравновешенны, на цилиндрические барабаны навито по два каната: когда один канат свивается, на его место навивается другой канат. Две подъемные установки обслуживают подъем – спуск двух платформ, и все время работают в режиме рекуперации. Расположение трасс подъемников в сечении одной траншеи ступенчатой формы позволяет организовать заезд – съезд самосвалов без дополнительных маневров. Недостатком схемы является необходимость строительства специальной траншеи с расположением железнодорожных путей в двух уровнях. Верхняя платформа конструктивно более сложная, чем нижняя.

Схема, приведенная на рис. 7, в части организации работы подъемных машин в целом аналогична схеме на рис. 6, но в данном случае две трассы подъемной установки расположены в диаметрально противоположных направлениях. Эта конструкция характеризуется более безопасной организацией движения самосвалов на верхней погрузочной площадке и обеспечивает съезд самосвалов с платформы в нижнем положении без дополнительных маневров. Данная схема характеризуется большим объемом горно-капитальных работ для создания площадок под здание подъемной машины и трассы подъемника и может быть применена на карьерах большой протяженности.

Выводы. В статье приведены результаты исследований по разработке и обоснованию рациональных конструкций карьерных наклонных подъемников для спуска в карьер порожних автосамосвалов, использование которых позволит сократить холостые пробеги автотранспорта. Снижение доли холостых пробегов в транспортном цикле автосамосвалов является одним из перспективных путей поддержания и повышения производительности карьерного транспорта.

Выполнен анализ основных схем карьерных наклонных подъемных установок в качестве

подъемных машин, в которых используются барабанные машины и машины со шкивами трения. Конструктивная сложность наклонных подъемных установок с канатоведущими шкивами трения, незащищенность канатов от воздействия атмосферных осадков (смачивание и обмерзание), повышенный износ канатов за счет трения об поддерживающие ролики и о шкивы подъемной установки обуславливают низкую надежность такой подъемной установки. Вышеназванных недостатков лишены подъемные машины с цилиндрическим барабаном. Вопрос обеспечения необходимой тяговой способности подъемной установки предлагается решать за счет использования в ее конструкции нескольких барабанных подъемных машин.

Приведены результаты конструкторской разработки подъемной установки для спуска в карьер порожних автосамосвалов грузоподъемностью 130 тонн. Рассмотрена схема подъемной установки с двумя синхронизированными подъемными барабанными машинами и полиспастной системой подвески одной грузовой платформы, что позволяет уменьшить концевую нагрузку в подъемных канатах. Разработанная подъем-

ная установка состоит из следующих основных частей: две однобарабанные подъемные машины типа 1-6x5,6/0,8 (производство НКМЗ); платформа для транспортировки самосвала; копер для размещения отклоняющих шкивов; два отклоняющих шкива; два наклонных рельсовых пути для перемещения платформы. При спуске автосамосвалов подъемные машины работают в генераторном режиме, что создает условия для рекуперации электрической энергии.

Эффективность технологии горных работ с использованием для спуска самосвалов в рабочую зону карьера разработанного устройства зависит от числа циклов в час. При необходимости обеспечить рабочую зону карьера большим числом автосамосвалов необходимо построить в карьере два аналогичных подъемника или разработать подъемную машину с двумя платформами. В статье предложены новые технические решения для подъемных машин с двумя платформами, которые попеременно используются для спуска в карьер порожних автосамосвалов. Разработанная технология создает условия, необходимые для повышения эксплуатационной производительности карьерных автосамосвалов.

Список литературы:

1. Новожилов М.Г., Селянин В.Г., Троп А.Е. Глубокие карьеры. М.: Госгортехиздат, 1962. 256 с.
2. Шиллинг Р., Адамс Б. Наклонные скиповые подъемники. Научн. тр. американского института горных инженеров, инженеров-металлургов и нефтяников. М.: Недра, 1971. С. 151–155.
3. Кульбида П.Б., Ройзен В.В., Сербин В.И. и др. Большегрузные скиповые подъемники для отработки глубоких карьеров. Горный журнал. 1981. № 7. С. 48–50.
4. Носырев Б.А. Схемы карьерных наклонных подъемных установок, их оценка и области применения. Труды Свердловского горного института. 1972. Вып. 97. С. 3–6.
5. Васильев М.В. Устройство, опыт эксплуатации и перспективы карьерного скипового подъема. Тр. ИГД МЧМ СССР. 1975. Вып. 46. С. 37–52.
6. Садыков Е.Л. Повышение эффективности многоканатных наклонных подъемных установок: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.06. Екатеринбург, 2011. 159 с.
7. Дремин А.И., Перепелицын А.И., Крутиков Н.Н. и др. Подъемник для доставки груженых автосамосвалов со дна карьера на поверхность. Горный журнал. 1993. № 7. С. 49–51.
8. Бондарев С.В., Горбатенко Ю.П. Застосування підйомачів для переміщення автомобілів по крутих схилах. Будівництво України. 2011. № 1. С. 26–28.
9. Листопад Г.Г. Наклонные подъемники карьерного автотранспорта. Горная промышленность. 2001. № 2. С. 57–58.
10. Build Unique Truck Skip Hoist in Belgian Congo. Mining World. 1959. № 6. P. 28.
11. Белобров В.И., Белоброва Е.А. Многоканатные наклонные подъемные установки для карьеров и шахт. Наук.-техн. зб. «Гірнична електромеханіка та автоматика». 2002. № 69. С. 155–159.
12. Белобров В.И., Белоброва Е.А. Обоснование режимов работы и определение расчетной производительности многоканатных карьерных подъемников. Науковий вісник НГУ. 2003. № 1. С. 57–59.
13. Trucklift System. Innovative transport technology for open pit mines. URL: http://www.siemag-tecberg.com/infocentre/technical-information/ti_27-trucklift.html.
14. Спосіб розкриття крутоспадних родовищ при відкритій розробці корисних копалин: пат. 111388 Україна: МПК (2016.01) E21C 41/26 (2006.01) E21C 47/00. № u201604545; заявл. 25 квітня 2016 р. опубл. 10 листопада 2016 р., Бюл. № 21. 5 с.
15. Слободянюк Р.В., Пижик М.М. Вдосконалення технології гірничих робіт з кільцевою схемою руху кар'єрних автосамоскидів. Вісник ЖДТУ. Серія: Технічні науки. Житомир: ЖДТУ, 2016. № 1 (76). С. 151–157.

АНАЛІЗ І РОЗРОБКА СХЕМ КАР'ЄРНИХ ПОХИЛИХ ПІДЙОМНИХ УСТАНОВОК

У статті виконано аналіз основних схем кар'єрних похилих підйомних установок. Для зниження в транспортному циклі автосамоскидів втрат часу, пов'язаних із холостим пробігом, запропоновано використовувати кар'єрні похилі установки для спуску в кар'єр порожніх автосамоскидів. Обґрунтовано, що в якості підйомних машин у кар'єрних установках раціонально використовувати машини з циліндричним барабаном. Виконано конструкторське опрацювання та визначено параметри підйомної машини з поліспаотною підвіскою однієї платформи для спуску автосамоскидів. Запропоновано нові технічні рішення для підйомних машин із двома платформами, які поперемінно використовуються для спуску в кар'єр порожніх автосамоскидів.

Ключові слова: кар'єрна похила підйомна установка, холостий пробіг автосамоскидів, барабанна підйомна машина, поліспаотна підвіска підйомних посудин, ресурсозберігаюча технологія.

ANALYSIS AND DEVELOPMENT OF SLOPE HOISTING SYSTEMS FOR OPEN PIT MINES

The article analyzes the basic diagrams of slope hoisting systems. In order to reduce the time losses associated with idle mileage in the transport cycle, it is proposed to use the slope hoisting plants only for hauling down the empty trucks. It is justified that the use of machines with a cylindrical drum as a hoister at the open pits is rational. The article presents the results of the design study and determination of parameters of a hoister with a reeving system of one platform for hauling down the trucks. The article proposes the new technical solutions for hoisters with two platforms, which are alternately used for hauling down the empty trucks.

Key words: slope hoisting plant, idle mileage of dump trucks, drum hoister, reeving system of vehicles, resource-saving technology.

МЕТАЛУРГІЯ

УДК 621.771.23

Курпе О.Г.

Товариство з обмеженою відповідальністю «Метінвест Холдінг»

Кухар В.В.

ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет»

РОЗШИРЕННЯ СОРТАМЕНТУ ЛИСТОВОГО ПРОКАТУ В УМОВАХ МЕТАЛУРГІЙНОГО ЗАВОДУ В ІТАЛІЇ

Розроблена технологія прокатки листів розміром 4 x 3 125 x 16 000 мм зі сляба розміром 217 x 1 355 x 780 мм, замість слябів товщиною 150 мм, для умов стану 3 200 заводу Metinvest Trametmetal SpA. Розроблена технологія забезпечує отримання кінцевої температури прокату 826°C, що дозволяє її використовувати для виробництва прокату згідно зі способом гарячої, нормалізуючої, контрольованої або ТМСР технології та не обмежує наявний марковий сортамент.

Ключові слова: моделювання, сила прокатки, температурний режим, технологія, товстолистовий стан.

Постановка проблеми. Відомо, що товстолистові стани спеціалізуються на виробництві прокату товщиною від 5 мм та більше. Однак попит ринку потребує виробництва більш тонкого прокату в сортаменті ширин, який виробляється на товстолистових станах і не може бути замінений сортаментом безперервних станів гарячої прокатки. Для виробництва прокату товщиною менше 5 мм здебільшого використовують сляби меншої товщини, цільове використання яких – рулонний прокат, це порушує баланс металу на підприємствах та змушує змінювати виробничі пріоритети.

Актуальність розроблення й оптимізації технології прокату листів товщиною 4 мм зі слябу товщиною 220 мм замість слябів товщиною 150 мм на заводі Trametmetal зумовлена потребою в розширенні сортаменту, а також недостатнім обсягом слябів товщиною 150 мм.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останнім часом поширилися способи розроблення технології за допомогою математичних моделей, які мають різну структуру та розроблені за допомогою різноманітних методів [1–3; 6; 7; 9].

Запропоновані авторами моделі мають різний рівень похибок. Так, у роботі [4] похибка визначена в силі прокатки та становить у середньому

142 т. Зауважимо, що така похибка залежить від рівня сили прокатки, що можна побачити на графіках, наведених у роботі [4]. Похибка в моделюванні, вказана авторами в роботі [10], становить $+ / - 10\%$, а в праці [11] похибка становить до 15,6% у першому проході і далі знижується. Отже, немає чітких рекомендації щодо точності розроблених моделей, але, безумовно, метою всіх авторів є її підвищення.

Наявність перевіреної моделі для розроблення технології прокатки на будь-якому стані суттєво спрощує цей процес, зменшує технологічні похибки та ризик отримання продукції незадовільної якості. Ще одна перевага – це можливість оптимізації процесу [5; 7; 8].

Особливе значення для оптимізації технологічних процесів має врахування параметрів обладнання, зазначене авторами роботи [5], яке дозволяє на етапі проектування керувати часом та температурою в комплексі з товщиною прокату, у двофазній області також, зменшувати кількість проходів, як зазначено авторами [7]. У праці [7] цікавим є режим прокатки під час отримання листа розмірами 5 x 3 200 мм зі сляба 150 мм, під час розрахунку якого виконана оптимізація зі зменшенням кількості проходів із 15 до 13, що

дозволило змогу підвищити температуру закінчення прокатки із 713°C до 821°C.

Зауважимо, що зазначені в літературних джерелах сортамент і способи оптимізації його виробництва є унікальними для кожного виробника, з огляду на характеристики обладнання, яке застосовується.

Постановка завдання. Метою роботи є розроблення технології виробництва прокату товщиною 4 мм із використанням безперервно литих слябів товщиною 220 мм замість слябів товщиною 150 мм для умов стану 3 200 заводу Metinvest Trametel SpA (лідера на італійському та європейському ринках товстолистового конструкційного прокату, який входить до складу групи «Метінвест»).

Виклад основного матеріалу дослідження. Серед основного обладнання лінії стану 3 200 заводу Trametel є методична шестизонна трирядна штовхальна піч, яка опалюється природним газом, однокільовий стан кварто, що має максимальну силу прокатки 40 МН, робочі валки з діаметром 730–810 мм, потужність головних двигунів 2 x 3 500 КВт, пристрій для проміжного охолодження прокату на повітрі, 12-тироликова машина для правки прокату, ножиці для поперечної різки, холодильник для остаточного охолодження прокату.

Схема розміщення основного обладнання на заводі Trametel SpA наведена на рис. 1.

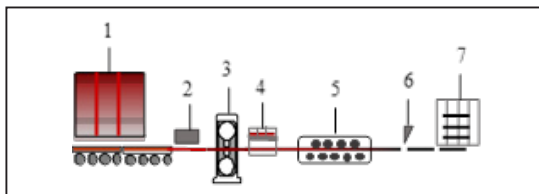


Рис. 1. Схема технологічної лінії з виробництва листового прокату на заводі Trametel SpA

- 1 – штовхальна методична піч; 5 – машина для правки прокату;
- 2 – камера гідрозбивання; 6 – ножиці для поперечної різки;
- 3 – кліть кварто 3 200; 7 – холодильник.
- 4 – пристрій для охолодження підкату на повітрі

Для розроблення технології виконано перевірку математичної моделі технологічного процесу прокатки [2], яку буде використано для подальших розрахунків.

Перевірку виконано на фактичних даних щодо температури та сили прокатки, отриманих під час прокатки листів розмірами 5 x 3 125 x 12 000 мм зі сталі A320, сляб № 1TL5800906 із фактичними розмірами 217 x 1 355 x 780 мм.

Результати моделювання наведені на рис. 2, 3.

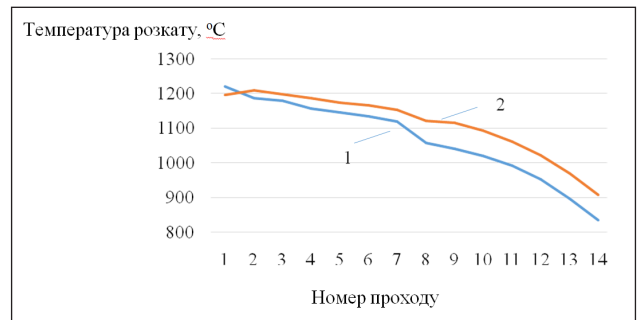


Рис. 2. Зміни розрахованої (1) та фактичної (2) температури за проходами в кліті 3 200

Середня похибка в моделюванні температурного режиму прокатки становить 4,3%, у моделюванні сили прокатки – 7,9%. Зауважимо, що достатньо великі похибки щодо сили прокатки в проході № 1 пов'язані зі зміною температури металу після гідрозбивання окалини в камері (2), рис. 1, а в проходах № № 11–14 – отримані внаслідок впливу переохолоджених торців прокату, які не враховувалися під час моделювання через відсутність фактичних даних щодо температури цих ділянок. Підтвердженням впливу переохолоджених торців є одностороннє перевищення фактичної сили прокатки в проходах № № 11–14.

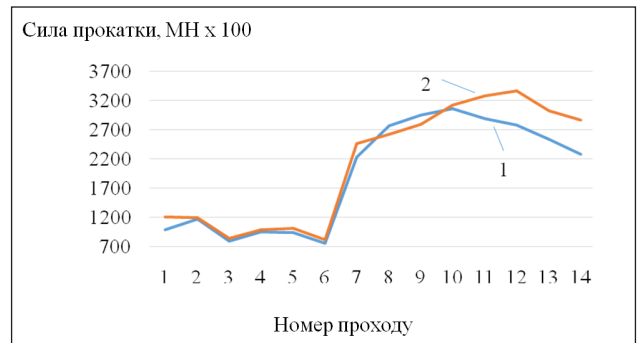


Рис. 3. Зміни розрахованої (1) та фактичної (2) сили прокатки за проходами в кліті 3 200

Результати розрахунку для перевірки математичної моделі наведені в табл. 1.

У таблиці 1 H та h – це товщина розкату до та після проходу в кліті, B – ширина прокату.

Отже, отримані похибки температури та сили прокатки дозволяють виконати моделювання технології для стану 3 200 заводу Trametel.

Варто зазначити, що за максимальної сили прокатки 40 МН фактична сила не перевищує 33,6 МН, що свідчить про наявність резерву, який можна використати.

Перевірка необхідної потужності головних двигунів через середньоквадратичні моменти

Таблиця 1

Результати перевірного розрахунку математичної моделі

№ проходу	H, мм	h, мм	B, мм	Температура прокатки, °C			Сила прокатки, МНх100			
				Розрахунок	факт	Δ, %	Розрахунок	факт	Δ, МН x 100	Δ, %
1	217	182,16	1 387	1 220	1 196	-2,0	985,3	1 209,3	224	18,5
2	182,16	146,41	1 387	1 186,1	1 209	1,9	1 169,4	1 196,9	27,5	2,3
3	146,41	123,64	1 200	1 178,9	1 197	1,5	792,2	849,9	57,7	6,8
4	123,64	98,83	1 200	1 155,4	1 186	2,6	956,7	991,1	34,4	3,5
5	98,83	77,47	1 200	1 145,5	1 173	2,3	948,0	1 010,8	62,8	6,2
6	77,47	64,0	1 200	1 133,2	1 166	2,8	754,3	818,5	64,2	7,8
7	64,0	50,2	3 146	1 118,9	1 153	3,0	2 234,2	2 457,9	223,7	9,1
8	50,2	37,58	3 146	1 057,1	1 120	5,6	2 765,7	2 618,7	-147	-5,6
9	37,58	26,56	3 146	1 040,6	1 115	6,7	2 949,7	2 788,9	-160,8	-5,8
10	26,56	17,85	3 146	1 018,9	1 093	6,8	3 055	3 113,7	58,7	1,9
11	17,85	12,09	3 146	991,7	1 060	6,4	2 887,5	3 280,4	392,9	12,0
12	12,09	8,42	3 146	951,7	1 022	6,9	2 773,8	3 365,1	591,3	17,6
13	8,42	6,36	3 146	895,9	969	7,5	2 535,9	3 025,7	489,8	16,2
14	6,36	5,22	3 146	834,0	907	8,0	2 274,4	2 857,3	582,9	20,4
Середня похибка						4,3				7,9

Таблиця 2

Хімічний склад сталі, з якої вироблявся прокат

Марка сталі	Масова доля елементів, %															
	C	Mn	Al	Nb	Si	S	P	Cu	Ni	Cr	V	Mo	Ti	N	B	H
A320	0,14–0,16	1,35–1,50	0,020–0,050	0,005	0,20–0,30	0,005	0,020	0,07	0,05	0,05	0,01	0,02	0,005	0,012	0,0005	0,0005

Таблиця 3

Розрахунок режимів прокатки листів розмірами 4 x 3 125 x 16 000, варіант 1

№ проходу	H, мм	h, мм	B, мм	Температура прокатки, °C	Час паузи, с	Швидкість, м/с	Сила прокатки, МН x 100
1	219,4	180	1 373	1 220	58	1,92	1 079,2
2	180	146	1 373	1 175	6	2,00	1 177,7
3	146	125	1 200	1 168	30	2,11	787,9
4	125	98	1 200	1 138	6	2,23	1 105
5	98	77	1 200	1 130	6	2,27	1 019,8
6	77	63	1 200	1 117	6	2,34	851,1
7	63	48	3 181	1 104	30	2,11	2 629,9
8	48	36	3 181	1 047	6	2,23	2 955,9
9	36	26	3 181	1 031	7	2,31	3 036,4
10	26	18	3 181	1 001	7	2,50	3 251,4
11	18	12	3 181	970	6	2,73	3 417,3
12	12	8,2	3 181	930	6	2,88	3 304,9
13	8,2	5,8	3 181	873	6	3,23	3 412,7
14	5,8	4,6	3 181	801	6	3,42	3 016,6
15	4,6	4	3 181	720	6	3,54	2 683,5

показала наявність суттєвого резерву, за сумарної потужності двох двигунів 7000 кВт фактична потужність під час прокатки розрахованого сортаменту не перевищила 2 900 кВт.

На основі виконаного аналізу пропонується декілька варіантів технології виробництва прокату.

Розроблення технології виробництва листового прокату розмірами 4 x 3 125 x 16 000 мм

Розрахунок режимів прокатки листів розмірами 4 x 3 125 x 16 000, варіант 2

№ проходу	H, мм	h, мм	B, мм	Температура прокатки, °С	Час паузи, с	Швидкість, м/с	Сила прокатки, МН x 100
1	219,4	180	1 373	1 220	10	1,92	1 079,2
2	180	146	1 373	1 210	5	2,00	1 065,7
3	146	125	1 200	1 203	10	2,11	712,8
4	125	98	1 200	1 188	5	2,23	954,2
5	98	77	1 200	1 179	5	2,27	882,2
6	77	63	1 200	1 165	5	2,34	737,6
7	63	48	3 181	1 151	10	2,11	2 280,0
8	48	32	3 181	1 122	5	2,23	2 909,9
9	32	20	3 181	1 102	5	2,31	2 923,9
10	20	12	3 181	1 063	5	2,50	2 979,1
11	12	7,5	3 181	1 013	5	2,73	2 837,0
12	7,5	5	3 181	934	5	2,88	2 926,9
13	5	4	3 181	826	5	3,23	2 493,7

зі слябів товщиною 220 мм сталі марки А320 (аналог марки S355 згідно з вимогами стандарту EN 10025–2) здійснювалась для умов стану 3 200 заводу Trametel.

Хімічний склад сталі, яка використовується, наведено в табл. 2.

З метою мінімізації змін до наявного регламенту роботи обладнання стану 3 200 заводу Trametel під час проектування технології розрахований показник енергосилових параметрів тримався на рівні, який фактично використовується згідно з наявною технологією.

Перший варіант технології

Розбивка розкату до отримання необхідної ширини готового прокату виконується однаково в усіх варіантах.

У всіх варіантах початкова температура прокатки становить 1 220°С. Товщини та ширини в таблицях вказані в гарячому стані.

Результати розрахунку наведені в табл. 3.

Перший варіант характеризується паузами, які зазвичай наявні в процесі прокатки на стані 3 200.

Сила прокатки в проходах № 11 та № 13 з урахуванням додаткового підвищення до 600 МН x 100, від впливу переохолоджених торців, наближується до максимальної сили згідно з характеристиками стану, що становить деякий ризик.

Температура закінчення прокатки становить 720°С, що відповідає умовам контрольованої прокатки або прокатки ТМСР і не відповідає умовам гарячої або нормалізуючої прокатки. Реалізація такого варіанту технології буде мати суттєві обмеження сортаменту, який виробляється.

Другий варіант технології

У другому варіанті технології час пауз між проходами був скорочений до рівня, який застосовується на товстолистових станах гарячої прокатки, наприклад, на стані 3 600 МК «Азовсталь» та стані 3 000 ММК ім. Ілліча. Також часткове зниження часу пауз (до 29 с та 20 с замість 58 с та 30 с відповідно) між проходами підтверджене фактичними даними під час прокатки листів товщиною 4,5 x 2 585 мм зі сляба товщиною 150 мм на стані 3 200 заводу Trametel.

Результати розрахунку наведені в табл. 4.

Завдяки зменшенню часу пауз вдалося підвищити температуру металу за проходами, що привело до зниження сили прокатки.

Зниження навантаження за проходами дозволило оптимізувати весь режим прокатки шляхом зменшення кількості проходів до 13-ти, отримати температуру закінчення прокатки на рівні 826°С.

Сила прокатки в усіх проходах з урахуванням додаткового підвищення до 600 МН x 100 від впливу переохолоджених торців не перевищує максимальної сили, згідно з характеристиками стану.

Такий варіант дозволяє виробляти прокат без технологічних обмежень, тобто за технологією гарячої, нормалізуючої, контрольованої прокатки або ТМСР технології. Для останніх двох технологій необхідно буде зробити паузу перед останніми проходами з метою виконання деформації в зоні міжкритичного перетворення або в зоні вже утвореного α -заліза залежно від вимог.

Порівняння зниження температури та зменшення часу пауз за двома варіантами наведено на рис. 4.

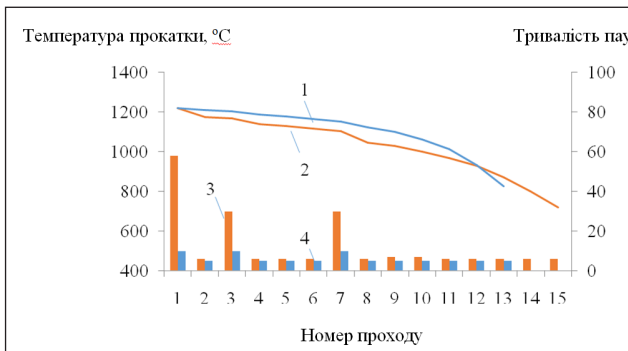


Рис. 4. Зміни розрахованої температури за варіантом 1 (1), варіантом 2 (2), тривалості пауз за варіантом 1 (3), варіантом 2 (4) за проходами в кліті 3 200

Порівняння двох варіантів технології свідчить про суттєві технологічні переваги варіанта 2, які

формується вже на перших шістьох проходах під час розбивки ширини.

Висновки. У роботі перевірено розроблену математичну модель на фактичних даних, отриманих на стані 3 200 заводу Trametel. Середня похибка під час моделювання температурного режиму прокатки становить 4,3%, під час моделювання сили прокатки – 7,9%.

Показана принципова можливість використання сляба товщиною 220 мм замість сляба товщиною 150 мм для виробництва прокату товщиною 4 мм.

Розроблена технологія прокатки листів розмірами 4 x 3 125 x 16 000 мм зі сляба розміром 217 x 1 355 x 780 мм, яку можна використовувати для виробництва прокату згідно зі способом гарячої, нормалізуючої, контрольованої або ТМСП технології, не обмежує наявний марковий сортамент.

Список літератури:

1. Старченко Д. Динамика продольной прокатки: учебное пособие. Киев: ИСИО, 1994. 400 с.
2. Курпе А. Моделирование технологического процесса прокатки толстых листов на стане 3 600 ОАО «МК «Азовсталь»: автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 05.16.05; ФГУП ЦНИИЧермет имени И.П. Бардина. Москва, 2006. 23 с.
3. Коновалов Ю. Справочник прокатчика. Производство горячекатаных листов и полос: справочное издание в 2-х книгах. Москва: Теплотехник, 2008. Книга 1. 640 с.
4. Duk Man Lee. Applications to improve rolling force prediction ability in a platemill. Automation in Mining, Mineral and Metal Processing. Nancy, France. 2004. P. 65–70. URL: [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)31001-7](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)31001-7).
5. Hu Xian-lei, Zhao Zhong, Wang Jun, Wang Zhao-dong, Liu Xiang-hua, Wang Guo-dong. Optimization of Holding Temperature and Holding Thickness for Controlled Rolling on Plate Mill. Journal of iron and steel research, International. 2006. №13 (3). P. 21–25. URL: [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(06\)60055-1](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(06)60055-1).
6. John G. Lenard. Primer on Flat Rolling. Mathematical and Physical Modelling of the Flat Rolling Process. Elsevier Ltd, 2007. Chapter 3. P. 36–98. URL: <https://doi.org/10.1016/B978-008045319-4/50005-X>.
7. Mantyla P., Korhonen R., Jonsson N-G. Improved Thickness and Shape Accuracy with Advanced Pass Scheduling in Plate Rolling. Journal of Materials Processing Technology. Elsevier. 1992. № 34. P. 255–263. URL: [https://doi.org/10.1016/0924-0136\(92\)90115-9](https://doi.org/10.1016/0924-0136(92)90115-9).
8. QI Xiang-dong, Wang Tao, Xiao Hong. Optimization of pass schedule in hot strip rolling. Journal of Iron and Steel Research, International. 2012. № 19 (8). P. 25–28. URL: [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(12\)60135-6](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(12)60135-6).
9. Yue S. The mathematical modelling of hot rolling of steel / J.G. Lenard (Editor). Metal Forming Science and Practice 9. Published by Elsevier Science Ltd., 2002. Chapter 11. P. 213–226. URL: <https://doi.org/10.1016/B978-008044024-8/50011-4>.
10. Yuen W.Y.D., Dixon A., Nguyen D.N. The modelling of the mechanics of deformation in fiat rolling. Journal of Materials Processing Technology. 1996. № 60. P. 87–94. URL: [https://doi.org/10.1016/0924-0136\(96\)02312-6](https://doi.org/10.1016/0924-0136(96)02312-6).
11. Jin-ling Zhag, Zhen-shan Cui. Prediction of velocity and deformation fields during multipass plate hot rolling by novel mixed analytical-numerical method. Journal of Iron and Steel Research, International. 2011. № 18 (7). P. 20–27. URL: [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(11\)60085-X](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(11)60085-X).

РАСШИРЕНИЕ СОРТАМЕНТА ЛИСТОВОГО ПРОКАТА В УСЛОВИЯХ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ЗАВОДА В ИТАЛИИ

Разработана технология прокатки листов размером 4 x 3125 x 16 000 мм из сляба размером 217 x 1 355 x 780 мм, вместо слябов толщиной 150 мм, для условий стана 3 200 завода Metinvest Trametel SpA. Разработанная технология обеспечивает получение конечной температуры проката 826°C, что позволяет применять ее для производства проката в соответствии со способами горячей, нормализующей, контролируемой или ТМСП технологий и не ограничивает существующий марочный сортамент.

Ключевые слова: моделирование, сила прокатки, температурный режим, технология, толстолистовой стан.

**ENHANCEMENT OF THE FLAT PRODUCTS MIX
AT THE METALLURGICAL PLANT IN ITALY**

Process development for production of 4 x 3 125 x 16 000 mm dimensions plate produced of as-cast slabs of 217 x 1 355 x 780 mm dimensions instead of slabs of 150 mm thickness for rolling mill 3 200 at Metinvest Trameal SpA. The developed technology ensures the rolled products final temperature of 826°C, and this allows to implement it for rolled products production by means of hot, normalizing, controlled or TMCP technology, and does not minimize the current grade product mix.

Key words: *simulation, rolling force, temperature conditions, technology, plate rolling mill.*

ХІМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 66.067.12:661.333]+542.8

Золотарьова О.В.

Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля

ФІЗИКО-ХІМІЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕРОБКИ ФІЛЬТРОВОЇ РІДИНИ СОДОВОГО ВИРОБНИЦТВА

Стаття присвячена можливості кооперації двох крупнотоннажних виробництв – содового і суперфосфатного. У такому органічному зв'язку відхід одного виробництва (фільтрова рідина содового виробництва) може стати сировиною (нейтралізатором, амонізатором) іншого (суперфосфатного). Пропонується технологія одержання подвійного (азотно-фосфорного) добрива. Карбонат і гідрокарбонат амонію та натрію, сульфід натрію, які входять до складу фільтрової рідини, можуть замінити аміак, що використовується для нейтралізації вільної кислотності простого суперфосфату.

Ключові слова: содове виробництво, фільтрова рідина, простий суперфосфат, аміак, азотно-фосфорне добриво, метод потенціометрії.

Постановка проблеми. Для переробки великої кількості фільтрової рідини в продукт народного господарства необхідний крупний споживач. Ним може бути сільське господарство, що споживає значну кількість добрив. Застосування хлористого амонію, який можливо отримати з фільтрової рідини, обмежене через наявність у ньому іону хлору і низький вміст поживної речовини – азоту (24–25%) [6].

Суперфосфат є найбільш розповсюдженим і універсальним фосфорним добривом, що ефективно використовується під будь-які культури і на всіх видах ґрунтів. Суперфосфат одержують розкладанням апатитового концентрату сірчаною кислотою. Більша частина фосфору в суперфосфаті міститься у вигляді водорозчинного $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ і вільної фосфорної кислоти. Висока кислотність суперфосфату викликає серйозні складнощі у його транспортуванні і застосуванні, оскільки він має погані фізичні властивості і значну хімічну агресивність.

Найбільш ефективними способами покращення властивостей простого суперфосфату є: а) нейтралізація вільної фосфорної кислоти додаванням карбонату кальцію, кісткового борошна і т. д.; б) обробка суперфосфату газоподібним або рідким аміаком або рідкими аміакатами, тобто амонізація суперфосфату. Нейтралізація вільної

кислотності аміаком є найбільш ефективним способом покращення його властивостей, оскільки дає можливість отримувати подвійне добриво, яке, крім фосфору, містить і азот [6].

Основною ідеєю нашого дослідження є заміна аміаку, що використовується для амонізації простого суперфосфату, карбонатом і гідрокарбонатом амонію та натрію, сульфідом натрію, які входять до складу фільтрової рідини содового виробництва.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблеми переробки фільтрової рідини содового виробництва розглядалися у роботах В.І. Молчанова, О.Я. Лобойко, Є.О. Михайлової, А.І. Посторонко та інших вчених. Однак і сьогодні під час проведення експерименту можливість кооперації двох крупнотоннажних виробництв – содового і суперфосфатного – викликає багато питань.

Постановка завдання. Метою дослідження є можливість використання фільтрової рідини содового виробництва для нейтралізації й амонізації простого суперфосфату, який є дуже кислим добривом ($\text{pH} \approx 2,5$).

Виклад основного матеріалу дослідження. Експериментальна установка складається зі збірника фільтрової рідини, бункера простого суперфосфату, змішувача. Змішувач обладнаний механічною мішалкою, що обертається з частотою

150 об/хв. Кришка змішувача має три штуцери: два для подачі фільтрової рідини і простого суперфосфату й один для відведення газів, що виділяються. До останнього приєднана трубка, по якій утворені гази CO_2 і H_2S надходять у тягу.

Суперфосфат і фільтрова рідина подаються у змішувач одночасно, змішуються протягом 5 хв. У процесі змішування відбирається проба пульпи для визначення рН. Після закінчення перемішування утворена пульпа переноситься в склянку і поміщається до сушильної шафи, в якій підтримується температура 105°C . За цієї температури амонізований суперфосфат витримується протягом 1 год. Після цього склянку охолоджують і зважують. Амонізований суперфосфат подрібнюють, визначають вихід продукту і вміст поживних елементів.

Визначення рН. Для вивчення зміни активної концентрації іонів водню під час взаємодії був використаний метод потенціометрії, заснований на точному вимірюванні електродного потенціалу і знаходженні за рівнянням Нернста активності потенціаловизначального іону в розчині [2]. Визначення проводилися на потенціометрі Р-307 зі скляним індикатором.

Визначення загального азоту. Визначення загального азоту здійснювалося за ГОСТом 30181.9-94 «Удобрения минеральные. Метод определения массовой доли общего азота в сложных удобрениях» [5].

Проби переносять у реакційну колбу, додають 35 см^3 дистильованої води, витримують протягом 10 хв, періодично злегка помішуючи вміст до розчинення всіх нітратів, потім додають порошок хрому масою 1,2 г (результат зважування записують із точністю до другого десяткового знака), 7 см^3 соляної кислоти і витримують колбу протягом 5–10 хв за температури навколишнього повітря. Потім колбу нагрівають протягом 4–5 хв на колбонагрівачі, відрегульованому таким чином, щоб 250 см^3 води з початковою температурою 25°C закипала протягом 7–7,5 хв.

Гідроліз амідного азоту проводять таким чином: колбу з аналізованою пробкою поміщають до витяжної шафи, вносять у колбу кілька «кіпелок», обережно додають 10 см^3 концентрованої сірчаної кислоти, закривають колбу порожнистою грушоподібною скляною пробкою і встановлюють на колбонагрівачі, відрегульованому таким чином, щоб 250 см^3 води з початковою температурою 25°C закипала протягом 20–30 хв. Вміст колби доводять до легкого кипіння і кип'ятять до повного припинення виділення білої пари, після

цього кип'ятять ще протягом 15 хв. Потім колбі дають охолонути, обережно додають 250 см^3 дистильованої води і знову охолоджують до температури навколишнього повітря.

У разі інтенсивного піноутворення зменшують нагрів. Після припинення утворення піни нагрів збільшують до кипіння і кип'ятять до повного припинення виділення щільних парів сірчаної кислоти, після чого вміст злегка перемішують і кип'ятять ще протягом 60 хв. Після закінчення нагрівання вміст колби охолоджують, обережно додають 250 см^3 дистильованої води і знову охолоджують до температури навколишнього повітря [3].

Збирають прилад для відгонки аміаку.

Перед з'єднанням у приймач додають розчин сірчаної кислоти. Об'єм і концентрація сірчаної кислоти залежать від маси загального азоту в навазці і визначаються за таблицею.

Потім додають у приймач 4–5 крапель розчину змішаного індикатора і такий об'єм дистильованої води, щоб барботер був закритий рідиною.

Після цього в крапельну воронку поміщають 100 см^3 розчину, що містить 400 г/дм^3 гідроксиду натрію, й обережно вводять цей розчин у реакційну колбу. Потім закривають кран, залишивши в крапельній воронці близько 2 см^3 розчину, і додають в неї 30 см^3 води. Після припинення бурхливої реакції в реакційній колбі поступово підсилюють нагрівання, доводять вміст колби до інтенсивного кипіння і кип'ятять розчин доти, поки не відгониться близько 150 см^3 .

Потім перевіряють відсутність аміаку в конденсаті. Для цього від'єднують приймач, обмивають кінець барботера, зливаючи промивні води в приймач, набирають у пробірку близько 1 см^3 дистилату і визначають повноту відгонки аміаку, додаючи кілька крапель реактиву Несслера (за відсутності аміаку не повинно з'являтися жовтого забарвлення) або за допомогою індикаторного паперу (значення рН 6–7). За великого значення рН відгонку продовжують, перевіряючи кожні 10 хв відсутність аміаку в конденсаті, як це зазначено вище. Після закінчення відгонки видаляють джерело тепла. Краплевловлювач від'єднують від холодильника і промивають холодильник, розширювач і зовнішню стінку вивідної трубки дистильованою водою, збираючи промивну воду в приймач.

Надлишок сірчаної кислоти відтитровують розчином гідроксиду натрію ($0,1\text{ моль/дм}^3$) в присутності змішаного індикатора до зміни забарвлення від фіолетового до зеленого.

Одночасно проводять контрольний дослід у тих же умовах і з тією ж кількістю реактивів, але без аналізованої проби, застосовуючи розчин сірчаної кислоти з молярною концентрацією 0,1 моль/дм³. Різниця між об'ємом розчину сірчаної кислоти й об'ємом розчину гідроксиду натрію, витраченого в контрольному досліді, не повинна перевищувати 1 см³, в іншому разі перевіряють реактиви, у першу чергу порошок хрому.

Визначення фосфору (в перерахунку на P₂O₅). Відповідно до ГОСТу 20851.2-75 «Удобрения минеральные. Методы определения фосфатов», фосфор, залежно від його форм, екстрагували таким чином:

- водорозчинну форму – водою;
- цитратнорозчинну – розчином лимонної кислоти;
- важкорозчинну форму – розчином соляної кислоти.

В екстрактах фосфор визначали ваговим способом згідно з ГОСТом 20851.2-75 «Удобрения минеральные. Методы определения фосфатов».

Виділення фосфатів соляною кислотою. 1 г наважки переносять у конічну колбу ємкістю 250–300 см³, змочують 5–10 см³ води і додають 30 см³ розчину 20%-ої соляної кислоти і води до об'єму 50 см³. Колбу накривають годинниковим склом і нагрівають спочатку повільно, а потім доводять до кипіння і повільно кип'ятять 60 хв, постійно перемішуючи скляною паличкою і додаючи воду в процесі випарювання води до об'єму 50 см³.

Після кип'ятіння розчин розбавляють вдвічі і переносять разом з осадом у мірну колбу на 250 см³. Після охолодження до кімнатної температури об'єм доводять до мітки водою, перемішують і фільтрують, перші порції фільтрату відкидаючи [5].

Виділення фосфатів лимонною кислотою. 2 г проби переносять у колбу Штохмана, заливають 250 см³ 2%-го розчину лимонної кислоти і відразу перемішують, щоб запобігти утворенню грудочок. Колбу закривають пробкою, встановлюють на ротаційний апарат і перемішують протягом 30 хв.

Потім доливають вміст колби водою до мітки, перемішують і фільтрують через фільтр, відкидаючи перші порції фільтрату.

Виділення фосфатів водою. 4 г проби переносять у мірну колбу на 500 см³, доливають 400 см³ води і відразу перемішують, щоб запобігти утворенню грудочок. Колбу закривають пробкою, встановлюють на ротаційний апарат і перемішують протягом 30 хв.

Потім доливають вміст колби водою до мітки, перемішують і фільтрують через фільтр, відкидаючи перші порції фільтрату.

Визначення фосфатів гравіметричним магnezіальним методом. У стакан місткістю 400 см³ відбирають об'єм екстракту, додають 20 см³ розчину соляної кислоти (1 : 1) і кип'ятять протягом 20 хв, після чого охолоджують. Далі до аналізованого розчину додають 10 см³ лимоннокислого амонію і нейтралізують 10%-им розчином аміаку в присутності фенолфталеїну. Потім повільно доливають, перемішуючи, 35–50 см³ магnezіальної суміші, а за 10–15 хв доливають 20 см³ 25%-го розчину аміаку. Вміст стакану перемішують ще 30 хв, а потім витримують у спокої 4 год. Відстояну рідину декантують через фільтр «синя стрічка», осадок кількісно переносять на фільтр, промивають зі склянки порціями 8–10 см³ 2,5%-го розчину аміаку. Осад на фільтрі промивається 3–4 рази.

Фільтр з осадом переміщують у попередньо прожарений до постійної маси тигель, знезолюють із доступом повітря за температури 700–800°C і прожарюють в муфельній печі за 1000–1050°C протягом 20–30 хв, потім тигель з осадом охолоджують в ексікаторі 40–60 хв і зважують.

Одночасно проводять контрольний дослід у тих же умовах і з тією ж кількістю реактивів у двох паралельних визначеннях, але без аналізованого розчину [4].

Важливо відзначити, що отримані після замішування системи за умови близьких співвідношень вихідних речовин (1 : 1) становлять масу, яка мажеться й утворює грудочки, що може бути використане для грануляції продукту під час сушки. У дослідах № 1–5 (партія І) за співвідношення вихідних речовин 0,5 : 1,0 отримується система з невеликою кількістю рідкої фази, система легко гранулюється і швидко висихає.

Дуже важливою обставиною є те, що наявність у сирій масі гіпсу дає порівняно рихлі структури, які мають велику питому поверхню. Це збільшує випаровування вологи і сушку, особливо з перемішуванням продукту. За зовнішнім виглядом отриманий амонізований суперфосфат є гранулами розміром від 0,5 до 2–3 мм з деякою часткою пилоподібних часток.

Значний інтерес представляє вихід продукту на одиницю витраченого суперфосфату. Використання фільтрової рідини для амонізації суперфосфату підвищує вихід продукту: за співвідношення 1 вагової частини суперфосфату на 1 об'ємну частину фільтрової рідини – на 43%; за співвідношення 1 : 2 – на 61%, за співвідношення 1 : 3 – в 2 рази.

Із цих хімічних аналізів амонізованого суперфосфату видно, що у разі збільшення співвідно-

шення фільтрової рідини (в об'ємних одиницях) на 1 вагову частину простого суперфосфату в інтервалі від 0,1 до 0,5 значення рН амонізованого суперфосфату підвищилося від 2,5 до 2,84, що відповідає утворенню $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$. Вміст вільного P_2O_5 зменшується з 6,1% мас (у вихідному суперфосфаті) до 0,23% мас за 0,4 об'ємних частин фільтрової рідини на 1 вагову частину суперфосфату і до 0% за 0,5 об'ємних частин фільтрової рідини на 1 вагову частину суперфосфату. Збільшення загального азоту досягло 3% мас за вмісту його в фільтровій рідині 5,3% мас і повної відсутності в простому суперфосфаті [1].

Вміст водорозчинного P_2O_5 в отриманому добриві зменшується відповідно до теоретичного розрахунку (т). Експериментально отримані (е) значення цієї форми є близькими до теоретично очікуваних. Ще більш близьким до теоретичного розрахованого є експериментально знайдений вміст P_2O_5 засвоюваної форми в інтервалі співвідношень фільтрова рідина : суперфосфат = 0,5 : 1.

Співвідношення $\text{P}_2\text{O}_{5\text{водн.}} / \text{P}_2\text{O}_{5\text{заг.}}$ не знизилася нижче 0,86, а $\text{P}_2\text{O}_{5\text{водн.}} / \text{P}_2\text{O}_{5\text{засв.}}$ склало 0,924 за 0,941 у вихідному суперфосфаті. Співвідношення $\text{P}_2\text{O}_{5\text{засв.}} / \text{P}_2\text{O}_{5\text{заг.}}$ за 10–30% фільтрової рідини перебувало на тому ж рівні, що й у вихідному суперфосфаті (0,953–0,954) і лише за 50% фільтрової рідини знизилася до 0,932 за теоретично очікуваного 0,953 [1].

Дослідами встановлено, що найкращі результати, з погляду нейтралізації суперфосфату, отримані за співвідношення суперфосфат : фільтрова рідина від 0,5 : 1.

Висновки. З дослідження можна зробити такі висновки:

1. Наявні способи переробки фільтрової рідини не дозволяють повністю ліквідувати рідкі відходи содового виробництва, оскільки вимагають дорогої апаратури через агресивні середовища, утворюють відходи другого складу та ін.

2. Карбонат і гідрокарбонат амонію та натрію, сульфід натрію, які входять до складу фільтрової

рідини, можуть замінити аміак, що використовується для нейтралізації вільної кислотності простого суперфосфату.

3. Досліджена можливість одержання подвійного добрива (NP) обробкою простого суперфосфату фільтровою рідиною содового виробництва. За результатами дослідження встановлено:

– співвідношення $\text{P}_2\text{O}_{5\text{засв.}} / \text{P}_2\text{O}_{5\text{заг.}}$ за 10–30% фільтрової рідини перебувало на тому ж рівні, що й у вихідному суперфосфаті (0,953–0,954) і лише за 50% фільтрової рідини знизилася до 0,932 за теоретично очікуваного 0,953;

– сума поживних речовин до співвідношення фільтрова рідина: суперфосфат 1 : 1, досягаючи більше 22% мас у перерахунку на суху речовину, практично залишається постійною.

4. Отримані експериментальні дані підтверджують можливість кооперації двох крупнотонажних виробництв – содового і суперфосфатного. У такому органічному зв'язку відхід одного виробництва (фільтрова рідина содового виробництва) може стати сировиною (нейтралізатором, амонізатором) іншого (суперфосфатного). Пропонувана технологія дасть можливість одержувати подвійне (азотно-фосфорне) добриво.

5. Зі збільшенням співвідношення фільтрової рідини (в об'ємних одиницях) на 1 вагову частину простого суперфосфату в інтервалі від 0,1 до 0,5 значення рН амонізованого суперфосфату підвищилося від 2,5 до 2,84, що відповідає утворенню $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$; вміст вільного P_2O_5 зменшується з 6,1% мас (у вихідному суперфосфаті) до 0,23% мас за 0,4 об'ємних частин фільтрової рідини на 1 вагову частину суперфосфату і до 0% за 0,5 об'ємних частин фільтрової рідини 1 вагову частину суперфосфату.

6. Вихід продукту збільшується за співвідношення 1 вагової частини суперфосфату на 1 об'ємну частину фільтрової рідини на 43%; за співвідношення 1 : 2 – на 61%, за співвідношення 1 : 3 – в 2 рази.

7. Співвідношення $\text{P}_2\text{O}_{5\text{водн.}} / \text{P}_2\text{O}_{5\text{заг.}}$ не знизилася нижче 0,86, а $\text{P}_2\text{O}_{5\text{водн.}} / \text{P}_2\text{O}_{5\text{засв.}}$ склало 0,924 за 0,941 у вихідному суперфосфаті.

Список літератури:

1. Колосова Н.В., Золотарьова О.В. Способ утилизации основного отхода производства кальцинированной соды. Chemistry and chemical technology: materials of the XIII International scientific and practical conference «Conduct of modern science – 2017». England, Sheffield, 2017. С. 97–100.
2. Крешков А.П. Основы аналитической химии. Физико-химические (инструментальные) методы анализа: учеб. пособ. Москва, 1970. Т. 3. 472 с.
3. Пат. 2495824 Российская Федерация, МПК C01C 1/16, C01C 1/28. Способ получения хлористого аммония / Мухаметов А.А., Мустафин А.Г., Воронин А.В., Садыков Н.Б.; заявитель и патентообладатель Мустафин А.Г. № 2012101375/5; заявл. 13 января 2012 г.; опубл. 20 июля 2013 г., Бюл. № 29.

4. Посторонко А.И. Физико-химическое исследование по переработке отходов содовой промышленности в минеральные удобрения и наполнители: дис. ... канд. хим. наук: 05.17.01. Киев, 1986. 189 с.
5. ГОСТ 20851.2-75. Удобрения минеральные. Методы определения фосфатов. Москва, 1976. 37 с.
6. Шокин И.Н., Крашенинников С.А. Технология соды: учеб. пособ. Москва. 1975. 288 с.

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕРАБОТКИ ФИЛЬТРОВОЙ ЖИДКОСТИ СОДОВОГО ПРОИЗВОДСТВА

Статья посвящена возможности кооперации двух крупнотоннажных производств – содового и суперфосфатного. В такой органической связи выход одного производства (фильтровой жидкости содового производства) может стать сырьем (нейтрализатором, аммонизатором) другого (суперфосфатного). Предлагается технология получения двойного азотно-фосфорного удобрения. Карбонат и гидрокарбонат аммония и натрия, сульфид натрия, которые входят в состав фильтровой жидкости, могут заменить аммиак, который используется для нейтрализации свободной кислоты простого суперфосфата.

Ключевые слова: содовое производство, фильтровая жидкость, простой суперфосфат, аммиак, азотно-фосфорное удобрение, метод потенциометрии.

PHYSICO-CHEMICAL STUDY ON PROCESSING THE FILTERED LIQUID OF SODA PRODUCTION

The article focuses on the possibility of co-operation of two large-scale manufacturers – soda and superphosphate. In such an organic connection, the waste of one production (filtered liquid of soda production) can become a raw material (neutralizer, ammonizer) of another (superphosphate) one. It is proposed the technology to produce double (nitrogen and phosphorus) fertilizer. Carbonate, ammonium and sodium bicarbonate, sodium sulfide that are part of the filtered fluid can replace ammonia, which is used to neutralize the free acidity of the simple superphosphate.

Key words: soda production, filtered liquid, simple superphosphate, ammonia, nitrogen and phosphorus fertilizer, method of potentiometry.

Колосов А.Е.

Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ СОЗДАНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ КОНСТРУКЦИОННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Проанализированы различные аспекты модификации составляющих реактопластичных материалов конструкционного назначения на основе классических композитов и нанокompозитов. Основной акцент сделан на ультразвуковую обработку как доминирующий метод физической модификации при получении реактопластов. Обсуждены вопросы проектирования технологического процесса получения функциональных полимерных композитов.

Ключевые слова: функциональный материал, конструкция, классические композиты, нанокompозиты, углерод, реактопласт.

Постановка проблемы. Реактопластичные полимерные композиционные материалы (далее – ПКМ), сочетающие малую плотность, высокий модуль упругости и прочность, в настоящее время широко используются в различных областях промышленности: авиастроении, автомобильной промышленности, строительстве, спортивной индустрии, медицине и др.

Под функциональными ПКМ, как правило, понимают ПКМ, обладающие специальными свойствами, определяемыми сферами их применения. В частности, к таким материалам относят как классические, так и наномодифицированные ПКМ. Функциональными ПКМ являются следующие материалы: теплоизоляционные, в т. ч. вспененные и сотовые, электроизоляционные; коррозионностойкие; токопроводящие; дугостойкие; фрикционные; антифрикционные; гидрофобные; огнестойкие; трещиностойкие; бронезащитные; интеллектуальные и др.

На современном этапе полимерного материаловедения физическая и химическая модификация составляющих компонентов реактопластичных ПКМ, а именно поверхности армирующих наполнителей (тканей, волокон, частиц и др.) и жидкого полимерного связующего, является базовым направлением создания функциональных ПКМ конструкционного назначения. Такая модификация, которая проводится с целью улучшения физико-механических и эксплуатационных свойств получаемых традиционных и наномодифицированных композитов, является актуальной задачей полимерного материаловедения.

Эта задача реализуется как комплексно, так и отдельно различными методами модификации (физической – в виде ультразвука (далее – УЗ), химической и комбинированной физико-химической) [1]. Поэтому анализ существующих и разработка новых подходов к реализации такой модификации являются актуальными.

Постановка задания. Целью статьи является краткий аналитический обзор разработанного методологического подхода к созданию функциональных классических и наномодифицированных полимерных композиционных материалов конструкционного назначения путем физической модификации составляющих их компонентов.

Изложение основного материала исследования. Вопросы проектирования технологического процесса получения функциональных традиционных (классических) и наномодифицированных ПКМ конструкционного назначения на основе реактопластов являются базовыми [2–4]. В частности, в работе [5] описаны направления развития технологии получения полимерных нанокompозитов, включая экономические аспекты реализации нанотехнологий их формования. Отмечено, что, несмотря на широкий спектр используемых технических средств, предназначенных для получения таких материалов, именно технические средства, использующие низкочастотный УЗ в режиме кавитации, заслуживают особого внимания.

Это связано с трудностями обеспечения равномерного распределения наночастиц в олигомере, обусловленное склонностью вводимых в него

наночастиц, вследствие их высокой поверхностной энергии, к взаимному притяжению, что приводит к их слипанию и агрегированию [6]. Показано, что необходимыми условиями для создания таких материалов являются малый размер и максимально однородное распределение частиц углеродного нанонаполнителя в жидкой полимерной матрице [7]. Установлено, что эффективность введения наночастиц в жидкую полимерную среду зависит не только от их дозировки, но и от технологических параметров проведения смешения, что приводит к необходимости их учета при разработке эффективных полимерных составов [8].

Отмечено, что одним из перспективных вариантов решения задачи модификации поверхности углеродного волокна и полимерного связующего для улучшения механических свойств конечного изделия является создание углепластиков комбинированного наполнения, в которых непрерывное углеродное волокно сочетается со связующим, в объеме которого равномерно распределены ультрадисперсные углеродные наночастицы [9].

Основные параметры УЗ-воздействия – частота, амплитуда, интенсивность, давление, температура, объем обрабатываемой жидкой среды. Совокупность взаимозависимых оптимальных параметров кавитационной обработки, как правило, устанавливаются экспериментально в каждом конкретном случае. В оптимуме найденная совокупность параметров УЗ-кавитационной обработки приводит к повышению физико-механических и эксплуатационных свойств затвердевших олигомеров и армированных композитов на их основе [10].

При этом величина упрочнения зависит от конкретного типа обрабатываемого олигомера и может варьироваться от 40–50% для традиционных затвердевших реактопластов или увеличиваться в несколько раз (в зависимости от типа используемого наномодификатора) по сравнению с исходным композитом для наномодифицированных реактопластов [11].

Было исследовано влияние разработанных режимов низкочастотной УЗ-кавитационной обработки на эксплуатационные свойства реактопластичных ПКМ по сравнению с известными методами. Найден эффективный диапазон взаимосвязанных параметров обработки. Полученные экспериментальные результаты подтвердили перспективность реализации такой модификации жидких олигомеров на примере эпоксидных олигомеров (далее – ЭО) и эпоксидных композиций (далее – ЭК).

Было установлено, что такая модификация эффективна не только в низкочастотном, но и в среднечастотном УЗ-диапазонах – как по отдельности, так и в комбинации [12]. Также является перспективным методом варьирование избыточного давления в процессе УЗ-обработки. В частности, это подтверждают результаты формования эпоксидных муфт с эффектом памяти формы. Установлено увеличение интенсивности и сокращение времени – как для отдельной операции озвучивания жидкой композиции, так и изготовления всего изделия в целом [13].

Как указывалось выше, целью применения УЗ-модификации армированных ПКМ является достижение спектра положительных результатов по завершению такой модификации. Первый положительный результат заключается в УЗ-активации поверхности и структуры армирующего волокнистого макрополнителя для улучшения его смачиваемости жидкой ЭК. Второй положительный результат заключается в дегазации структуры армирующего макрополнителя непосредственно перед его пропиткой. Третьим положительным результатом является увеличение производительности (не менее чем в 2 раза) операций озвучивания, пропитки, дозированного нанесения жидкой ЭК и намотки при сохранении стабильности свойств конечного композита.

Еще одним положительным результатом является стабилизация содержания полимерного связующего в пропитанном тканом наполнителе при вариации скорости его протягивания в операциях пропитки и дозированного нанесения [14]. Наконец, эффективные параметры УЗ-обработки способствуют повышению деформационно-прочностных и адгезионных характеристик композиционных материалов, снижают уровень остаточных напряжений, увеличивают долговечность, а также сокращают кумулятивное время твердения [15].

В результате практического использования методов УЗ-кавитационной обработки были усовершенствованы конструкции узлов пропитки, дозированного нанесения и намотки на серийном пропиточно-сушильном оборудовании. Вышеописанные результаты еще раз подтверждают выбор УЗ-обработки как основного метода физической модификации жидких (в т. ч. полимерных) сред и армированных волокнистых ПКМ функционального назначения на основных стадиях их получения.

Несмотря на существование огромного спектра средств УЗ-кавитационной обработки, используемые на практике технические средства для УЗ-модификации жидких полимерных сред и

армирующих наполнителей на их основе можно условно разделить на УЗ-концентраторы – трансформаторы скорости и излучающие пластины. УЗ-концентраторы эффективно используется преимущественно при обработке жидких полимерных сред, в т. ч. при введении в них наномодификаторов. Излучающие пластины используется преимущественно при обработке пропитываемых тканых волокнистых наполнителей шириной до 2 000 мм.

Вследствие различия в объектах применения для обоих вышеуказанных типов УЗ-технических средств необходимо определять эффективные конструктивно-технологические параметры [16]. В противном случае возможно появление дефектных участков получаемого конечного композитного материала (как традиционного, так и наномодифицированного). При этом в случае обработки пропитываемых тканей преимущество имеют УЗ-кавитаторы на основе пьезокерамических преобразователей с излучательной пластиной, которая испытывает изгибные колебания [17]. Помимо этого, необходимо расчетно-экспериментальными способами устранять неравномерность изгибных колебаний излучающих прямоугольных пластин. Реализация разработанного подхода по использованию эффективных УЗ-средств позволяет получать широкий спектр практически бездефектных традиционных и наномодифицированных ПКМ функционального назначения.

Задачи проектирования технологии и оборудования для получения традиционных и наномодифицированных функциональных ПКМ направлены на выявление и изучение взаимосвязей между структурно-механическими и геометрическими параметрами изделий с одной стороны и технологическими факторами их производства с другой стороны.

Например, полученные аналитически кинетические уравнения продольной и поперечной пропитки ориентированных и тканых волокнистых наполнителей жидкими ЭК позволяют прогнозировать время пропитки и скорость протяжки волокнистого наполнителя через пропиточную ванну, а также проектировать ее габариты [18]. Проектировать оптимальное усилие натяжения пропитанных волокнистых наполнителей при окружной намотке позволяет изучение экспериментальных результатов по влиянию технологических режимов пропитки на прочность пропитанных и отвержденных волокнистых наполнителей [19; 20].

Причем для минимизации материальных и временных затрат, как правило, применяют мето-

дику структурно-параметрического моделирования конструкционно-технологических параметров технологии и оборудования (инструментов) для озвучивания жидких полимерных сред и для получения реактопластичных ПКМ [2].

Например, исследуемую классическую структурную схему пропитки и дозированного нанесения полимерного (эпоксидного) связующего на длинномерный волокнистый наполнитель с использованием УЗ-модификации представляется целесообразным разделить на отдельные структурированные блоки: 1) блок озвучивания ЭО и приготовления пропиточной композиции (ЭК) на его основе; 2) блок «свободной» пропитки ориентированного (тканого) волокнистого наполнителя жидким ЭК; 3) блок дозированного нанесения жидкого ЭК на пропитанный волокнистый наполнитель. Далее в рамках проведения синтеза анализируются только вышеуказанные укрупненные блоки и их составляющие структурные элементы, а также конструкционно-технологические взаимосвязи между ними.

При проектировании функциональных наномодифицированных ПКМ особо следует остановиться на выборе нанонаполнителя. В настоящее время наибольшее применение в качестве углеродных нанонаполнителей для реактопластичных ПКМ нашли такие группы волокнистых наночастиц: углеродные нанотрубки (далее – УНТ), как одностенные, так и многостенные, а также углеродные нановолокна (далее – УНВ).

УНТ обладают рядом уникальных свойств, отличающих их от традиционных макронаполнителей ПКМ. Они относятся к наиболее важным объектам современной нанотехнологии и поэтому являются основой создания нового поколения разнообразных функциональных материалов, приборов и устройств на их основе [21]. Тонкие одностенные УНТ обладают максимальной удельной площадью поверхности (до 1 360 м²/г) и, следовательно, теоретически имеют наибольший потенциал. Но на практике оказалось, что они больше других подвержены агломерированию под действием Ван-дер-ваальсовых сил. К тому же, существующие методы производства однослойных УНТ пока не позволяют получать их в промышленных объемах.

Широкое применение получили многослойные УНТ, которые производятся в промышленных объемах, как правило, методом химического осаждения на катализаторе (пиролиз природных газов). В то же время упрочняющее воздействие на полимеры многослойных УНТ ниже, чем одно-

слоиных УНТ, но первые гораздо доступнее, чем вторые, и свойства их стабильнее.

УНВ представляют собой нитевидные наночастицы без протяженных внутренних полостей. По существу, это те же УНТ, только больших размеров и с более развитой поверхностью, что улучшает их взаимодействие с полимерной матрицей. В силу своей структуры УНВ меньше подвержены агрегатированию и могут вводиться в жидкий полимер без дополнительной функционализации. Плотность УНТ и УНВ не превышает 2 г/см^3 , что делает их легкоосесными наполнителями. Кроме того, в отличие от обычных углеродных волокон, УНТ и УНВ не являются хрупкими.

В качестве наполнителей полимеров при оптимальной концентрации УНТ и УНВ способны: повысить электропроводность; увеличить теплопроводность, теплостойкость, температуру воспламенения; улучшить механические характеристики; изменить структуру полимера, в т. ч. повысить степень его кристалличности, увеличить температуру стеклования; придать наполненным композитам те или иные функциональные свойства (прочность, электропроводность, трещиностойкость, способность снимать статические заряды, рассеивать и поглощать радиоизлучение или лазерное излучение, усиливать электролюминесценцию, повышать другие физико-механические и эксплуатационные характеристики).

Что касается «классических» армирующих наполнителей (макроволокон) для волокнистых ПКМ, то следует отметить, что макроволокна с УНТ рассматриваются сегодня как основа для создания прежде всего уникальных по прочности и функциональным возможностям высоконагруженных конструкционных материалов и изделий на их основе. Среди последних следует

отметить: 1) легкоосесные ответственные (высоконагруженные) детали летательных аппаратов и механических устройств; 2) изделия специального назначения (бронежилеты, каски, костюмы с вплетенными в армирующую ткань нагревателями, сенсорами и актюаторами и др.) [21].

Другими примерами применения функциональных полимерных наноматериалов является создание фильтровальных тканей, способных работать в очень жестких условиях. Известно, что ведутся разработки космического лифта – троса, связывающего Землю с геостационарным спутником. Не менее перспективным направлением применения функциональных материалов является замена металлических проводов линий электропередач на макроволокна из УНТ.

Волокна и ткани с УНТ также перспективны для изготовления спортивных снарядов, в частности теннисных ракеток, лыж, хоккейных клюшек, бамперов и деталей автомобилей, велосипедных рам и многого другого. По мере развития производства, снижения себестоимости и мировых цен на УНТ (что происходит довольно быстро) области применения таких волокон и тканей будут значительно расширяться [21].

Выводы. Разработка и проектирование эффективных технических средств низкочастотной УЗ-кавитационной обработки является эффективным направлением реализации предложенного подхода к созданию функциональных классических и наномодифицированных ПКМ конструкционного назначения. Показано, что в оптимуме такая физическая модификация направлена на интенсификацию многих технологических операций получения таких материалов, а также на улучшение физико-механических и эксплуатационных характеристик получаемых изделий и конструкций на их основе.

Список литературы:

1. Kolosov A.E. Prerequisites for using ultrasonic treatment for intensifying production of polymer composite materials. *Chem. and Petrol. Eng.* 2014. Vol. 50. Is. 1–2. P. 11–17. DOI: 10.1007/s10556-014-9846-5.
2. Kolosov A.E., Virchenko G.A., Kolosova E.P., Virchenko G.I. Structural and technological design of ways for preparing reactoplastic composite fiber materials based on structural parametric modeling. *Chem. and Petrol. Eng.* 2015. Vol. 51. Is. 7–8. P. 493–500. DOI: 10.1007/s10556-015-0075-3.
3. Kolosov A.E., Sakharov A.S., Sivetskii V.I., Sidorov D.E., Sokolskii A.L. Substantiation of the efficiency of using ultrasonic modification as a basis of a production cycle for preparing reinforced objects of epoxy polymer composition. *Chem. and Petrol. Eng.* 2012. Vol. 48. Is. 5–6. P. 391–397. DOI: 10.1007/s10556-012-9629-9.
4. Kolosov A.E. Low-Frequency Ultrasonic Treatment as an Effective Method for Modifying Liquid Reactoplastic Media. *Chem. and Petrol. Eng.* 2014. Vol. 50. Is. 1–2. P. 79–83. DOI: 10.1007/s10556-014-9859-0.
5. Kolosov A.E. Preparation of Nano-Modified Reactoplast Polymer Composites. Part 1. Features of used nanotechnologies and potential application areas of nanocomposites (a review). *Chem. and Petrol. Eng.* 2015. Vol. 51. Is. 7–8. P. 569–573. DOI: 10.1007/s10556-015-0088-y.

6. Kolosov A.E. Preparation of Reactoplastic Nanomodified Polymer Composites. Part 2. Analysis of means of forming nanocomposites (patent review). Chem. and Petrol. Eng. 2016. Vol. 51. Is. 9–10. P. 640–645. DOI: 10.1007/s10556-016-0100-1).
7. Kolosov A.E. Preparation of Reactoplastic Nanomodified Polymer Composites. Part 3. Methods for dispersing carbon nanotubes in organic solvents and liquid polymeric media (review). Chem. and Petrol. Eng. 2016. Vol. 52. Is. 1–2. P. 71–76. DOI: 10.1007/s10556-016-0151-3.
8. Kolosov A.E. Preparation of Reactoplastic Nanomodified Polymer Composites. Part 4. Effectiveness of modifying epoxide oligomers with carbon nanotubes (review). Chem. and Petrol. Eng. 2016. Vol. 52. Is. 7–8. P. 573–577. DOI: 10.1007/s10556-016-0235-0.
9. Kolosov A.E. Preparation of Reactoplastic Nano-Modified Polymer Composites. Part 5. Advantages of using nano-modified structural carbon-fiber composites (a review). Chem. and Petrol. Eng. 2017. Vol. 52. Is. 9–10. P. 721–725. DOI: 10.1007/s10556-017-0259-0.
10. Karimov A.A., Kolosov A.E., Khozin V.G., Klyavlin V.V. Impregnation of fibrous fillers with polymer binders. 4. Effect of the parameters of ultrasound treatment on the strength characteristics of epoxy binders. Mech. of Compos. Mater. 1989. Vol. 25. Is. 1. P. 82–88. DOI: 10.1007/BF00608456.
11. Kolosov A.E. Effect of low-frequency ultrasonic treatment regimes on reactoplastic polymer composite material operating properties. Chem. and Petrol. Eng. 2014. Vol. 50. Is. 3–4. P. 150–155. DOI: 10.1007/s10556-014-9871-4.
12. Kolosov A.E. Efficiency of liquid reactoplastic composite heterofrequency ultrasonic treatment. Chem. and Petrol. Eng. 2014. Vol. 50. Is. 3–4. P. 268–272. DOI: 10.1007/s10556-014-9893-y.
13. Kolosov A.E. Low-Frequency Ultrasonic Treatment of Liquid Reactoplastic Media with Pressure Variation. Chem. and Petrol. Eng. 2014. Vol. 50. Is. 5–6. P. 339–342. DOI: 10.1007/s10556-014-9904-z.
14. Kolosov A.E., Karimov A.A., Khozin V.G., Klyavlin V.V. Impregnation of fibrous fillers with polymer binders. 3. Ultrasonic intensification of impregnation. Mech. of Compos. Mater. 1989. Vol. 24, Is. 4, pp 494–502. DOI: 10.1007/BF00608132.
15. Kolosov A. E., Karimov A. A., Repelis I.A., Khozin V.G., Klyavlin V.V. Impregnation of fibrous fillers with polymeric binders 6. Effect of parameters of ultrasound treatment on strength properties of wound fibrous composites. Mech. of Compos. Mater. 1990. Vol. 25. Is. 4. P. 548–555. DOI: 10.1007/BF00610711.
16. Kolosov A.E., Sakharov A.S., Sivetskii V.I., Sidorov D.E., Sokolskii A.L. Method of selecting efficient design and operating parameters for equipment used for the ultrasonic modification of liquid-polymer composites and fibrous fillers. Chem. and Petrol. Eng. 2012. Vol. 48. Is. 7–8. P. 459–466. DOI: 10.1007/s10556-012-9640-1.
17. Kolosov A.E., Sivetskii V.I., Kolosova E.P., Lugovskaya E.A. Procedure for analysis of ultrasonic cavitator with radiative plate. Chem. and Petrol. Eng. 2013. Vol. 48. Is. 11–12. P. 662–672. DOI: 10.1007/s10556-013-9677-9.
18. Kolosov A.E. Impregnation of fibrous fillers with polymer binders. 1. Kinetic equations of longitudinal and transverse impregnation. Mech. of Compos. Mater. 1988. Vol. 23. Is. 5. P. 625–633. DOI: 10.1007/BF00605688.
19. Kolosov A.E., Repelis I.A., Khozin V.G., Klyavlin V.V. Impregnation of fibrous fillers with polymer binders. 2. Effect of the impregnation regimes on the strength of the impregnated fillers. Mech. of Compos. Mater. 1988. Vol. 24. Is. 3. P. 373–380. DOI: 10.1007/BF00606611.
20. Kolosov A.E., Repelis I.A. Saturation of fibrous fillers with polymer binders 5. Optimization of parameters of the winding conditions. Mech. of Compos. Mater. 1989. Vol. 25. Is. 3. P. 407–415. DOI: 10.1007/BF00614811.
21. Stepanishev N. Nanocomposites. The problem of filling. M. Plastiks. 2010. Vol. 4 (86). P. 23–27. http://www.plastics.ru/pdf/Stepanishev_04_2010.pdf.

ДЕЯКІ АСПЕКТИ СТВОРЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ КОНСТРУКЦІЙНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Проаналізовано різні аспекти модифікації складових частин реактопластичних матеріалів конструкційного призначення на основі класичних композитів і нанокompозитів. Основний акцент зроблено на ультразвуковій обробці як домінуючому методі фізичної модифікації для одержання реактопластів. Обговорено питання проектування технологічного процесу одержання функціональних полімерних композитів.

Ключові слова: функціональний матеріал, конструкція, класичні композити, нанокompозити, вуглець, реактопласт.

SOME ASPECTS OF THE CREATION OF FUNCTIONAL POLYMER COMPOSITE MATERIALS OF STRUCTURAL APPLICATION

Various aspects of modification of constituents of thermosetting materials for structural purposes based on classical composites and nanocomposites are analyzed. The main emphasis is on ultrasonic treatment as the dominant method of physical modification in the production of thermosets. The questions of designing the technological process for the production of functional polymer composites are discussed.

Key words: functional material, construction, classical composites, nanocomposites, carbon, thermoset.

ТЕХНОЛОГІЯ ХАРЧОВОЇ ТА ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

УДК 664.8.047

Бендерська О.В.

Національний університет харчових технологій

Бессараб О.С.

Національний університет харчових технологій

ДЕЯКІ АСПЕКТИ ВИКОРИСТАННЯ ВТОРИННОЇ ТОМАТНОЇ СИРОВИНИ В ТЕХНОЛОГІЯХ ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ

У статті наведено результати теоретичних та експериментальних досліджень фізико-хімічного складу томатного насіння. Встановлено, що насіння томатів має високу харчову та біологічну цінність, яка зумовлена підвищеним вмістом білків, ліпідів, вуглеводів і наближена до сучасних рекомендацій щодо створення раціонів здорового харчування населення. Також насіння томатів багате поліненасиченими жирними кислотами, фосфоліпідами, макро- і мікроелементами, вітаміном Е. Однак його харчову цінність значною мірою знижують природні біологічно активні антиаліментарні речовини – інгібітори протеїнази. Авторами досліджено вміст та активність антипоживних речовин томатного насіння і запропоновано шляхи зниження ренні-можливості застосування вторинної томатної сировини, а саме томатного насіння в технологіях консервованих продуктів із підвищеною біологічною цінністю.

Ключові слова: томати, протеїнази, соус, насіння, інактивація, трипсин.

Постановка проблеми. В останні роки все більш актуальними є питання розроблення технології комплексного перероблення рослинної сировини, яка повинна враховувати не тільки технологічні процеси перероблення, а також отримання готового продукту з заданими якісними характеристиками, створення циклів безвідходного харчового виробництва й отримання готового продукту, який відповідає всім вимогам нутріціології. Відомо, що під час промислової переробки рослинної сировини утворюється велика кількість відходів, які містять безліч корисних компонентів, що необхідні в раціонах збалансованого харчування населення [1]. У цьому аспекті нами запропоновано розглядати вторинну сировину, що утворюється у процесі виробництва томатопродуктів, як джерело отримання біологічно активних речовин із подальшим їх використанням у технологіях харчових продуктів.

Томати мають високий вміст води (91–94%), але необхідно враховувати їх високу харчову цінність, зумовлену наявністю вуглеводів, жирів і

білкових речовин, які є легкозасвоюваними. Аналіз хімічного складу томатів і їх напівфабрикатів показав доцільність створення на їх основі нових видів харчових продуктів.

У літературі існує достатньо відомостей про хімічний склад томатів [1–3], але недостатньо вивчений фізико-хімічний і біохімічний склад вторинних томатних ресурсів, а саме томатного насіння. З метою ефективного використання сировини й отримання томатних соусів із високими показниками якості постає задача дослідження фізико-хімічного складу томатного насіння.

Постановка завдання. Метою роботи є дослідження та наукове обґрунтування застосування вторинних томатних ресурсів у технології харчових продуктів.

Виклад основного матеріалу дослідження. Для досліджень використовувалися томати сортів Алексія, Лампо, Ліона, районовані в центральному регіоні України, врожаю 2016–2017 рр. і їх насіння, що безпосередньо було використане для проведення досліджень.

Хімічний склад томатного насіння досліджували з використанням загальновідомих методів: масова частка вуглеводів – за методикою [4]; мінеральний склад – атомно-емісійною спектрометрією [5]; вміст органічних кислот – шляхом титриметричного визначення [6].

Для визначення антипоживних речовин користувалися методом визначення активності інгібіторів трипсину в рослинній сировині та його модифікацією – казеїнолітичним методом М.Л. Какейда, визначення трипсин-інгібуючої активності І.І. Бенкена, апробованою на різних білковомісних культурах [6].

Сьогодні потенціал корисних властивостей вторинної томатної сировини майже не використовується в харчовій промисловості, тому що недостатньо досконалі залишаються підходи до створення безвідходних технологій. Враховуючи вищезазначене, актуальним є питання розроблення технологій комплексного перероблення томатної сировини, яка включатиме перероблення пульпи томатів і вторинних томатних ресурсів із метою отримання харчових продуктів, які володіють підвищеним вмістом незамінних амінокислот, що входять до складу соле- та водорозчинних білків. Попередні дослідження показують, що томатне насіння також багате на легкозасвоювані вуглеводи та поліненасичені жирні кислоти з оптимальним співвідношенням омега-3 й омега-6 жирних кислот.

Для підтвердження наявних даних визначено хімічний склад насіння томатів різних сортів, найбільш культивованих у центральному регіоні України. Усереднений хімічний склад насіння томатів наведено в табл. 1.

Аналіз отриманих даних показав, що насіння томатів сортів Алексія, Лампо та Ліона має високу харчову цінність, яка зумовлена підвищеним вмістом білків, ліпідів, вуглеводів і наближена до сучасних рекомендацій щодо створення раціонів здорового харчування населення. Встановлено, що насіння томатів багате поліненасиченими жирними кислотами, фосфоліпідами, макро- і мікроелементами, вітаміном Е та клітковиною [7], але його харчова цінність значною мірою залежить від природних біологічно активних антиаліментарних речовин – інгібіторів протеїназ.

Білкові речовини зумовлюють харчову та біологічну цінність продуктів харчування. Водночас високий вміст білків у насінні може говорити про наявність антипоживних речовин. Вміст інгібіторів у деяких рослинах призводить до значного зниження харчової цінності білкових продуктів. Присутність інгібіторів протеїназ у раціоні харчу-

вання тварин і людини призводить до негативних фізіологічних явищ. Як відомо, вміст комплексів трипсин-інгібітор викликає інтенсивний синтез ферментів підшлункової залози. Це призводить до збільшення трансформації метіоніну в цистин, що, у свою чергу, збільшує потребу в сірковмісних амінокислотах, яка не може бути компенсована білками, які надходять із їжею.

Відомо, що секреція соку підшлункової залози регулюється процесом травлення. Перетравлюваність їжі залежить від рівня трипсину і хімотрипсину в кишечнику. Коли рівень цих ферментів під дією інгібіторів падає нижче критичного значення, підшлункова залоза починає виробляти більше ферментів. Через зв'язування трипсину з інгібітором може відбуватися також уповільнення травлення.

Інгібітори протеолітичних ферментів виявлені у багатьох видах рослин, що належать до різних систематичних груп. Вміст інгібіторів протеїназ у рослинах змінюється під впливом умов вирощування. Однак видові і сортові відмінності їх вмісту, а також компонентний склад інгібіторів зберігаються незалежно від року репродукції, що свідчить про генетичну зумовленість цієї ознаки [8].

З усього спектру антиаліментарних факторів найбільший інтерес становлять інгібітори трипсину через їх широке поширення і високий вміст у запасній частині рослин – насінні. Фізіологічні функції цих речовин білкової природи досить вивчені: вони можуть грати роль запасних білків, регулювати активність протеолітичних процесів, запобігати передчасному розпаду резервних білків; пригнічувати активність протеїназ ряду шкідливих комах і фітопатогенних мікроорганізмів, тим самим захищаючи рослини від ураження [9]. Надходження в організм підвищеної кількості цих антиаліментарних чинників призводить до зменшення процесу гідролізу білків їжі, зниження ефективності їх засвоєння.

Нами проведено дослідження активності білків-інгібіторів трипсину в насінні томатів. Отримані результати наведено в табл. 2.

Аналіз даних показує, що існує залежність між кількістю білкових речовин томатного насіння та наявністю інгібіторів протеїназ. Також існують дані [10] про генетичну природу накопичення антипоживних речовин. Так, для сорту Лампо, що містив у своєму насінні найвищу кількість білка, активність інгібіторів трипсину була на рівні 0,61 мг/г білка, що на 17,3% за вміст антипоживних речовин в сорті Алексія, який використовували для подальших досліджень.

Таблиця 1

Хімічний склад насіння томатів, % СР

Харчова цінність/сорт	Алексія	Лампо	Ліона
білок	34,03±0,5	35,37±0,5	32,03±0,5
ліпіди, в т.ч. фосфоліпіди	31,44±0,2	29,24±0,2	32,44±0,2
вуглеводи в т.ч. клітковина	28,83±1	30,83±1	29,83±1
мінеральні речовини	17,92±0,5	17,92±0,5	17,92±0,5
каротиноїди	3,35±0,5	2,65±0,5	3,35±0,5
токофероли, в т.ч. α – токоферол	0,018±0,5	0,018±0,5	0,018±0,5
α – томатин	0,073±0,2	0,070±0,2	0,073±0,2
	0,055±0,5	0,050±0,5	0,055±0,5
	0,030±0,5	0,030±0,5	0,030±0,5

Таблиця 2

Активність інгібіторів трипсину томатного насіння

Сорт	Алексія	Лампо	Ліона
Вміст білка, % СР	34,03±0,5	35,37±0,5	32,03±0,5
Показник активності інгібіторів мг/г білка	0,52±0,1	0,61±0,1	0,55±0,1

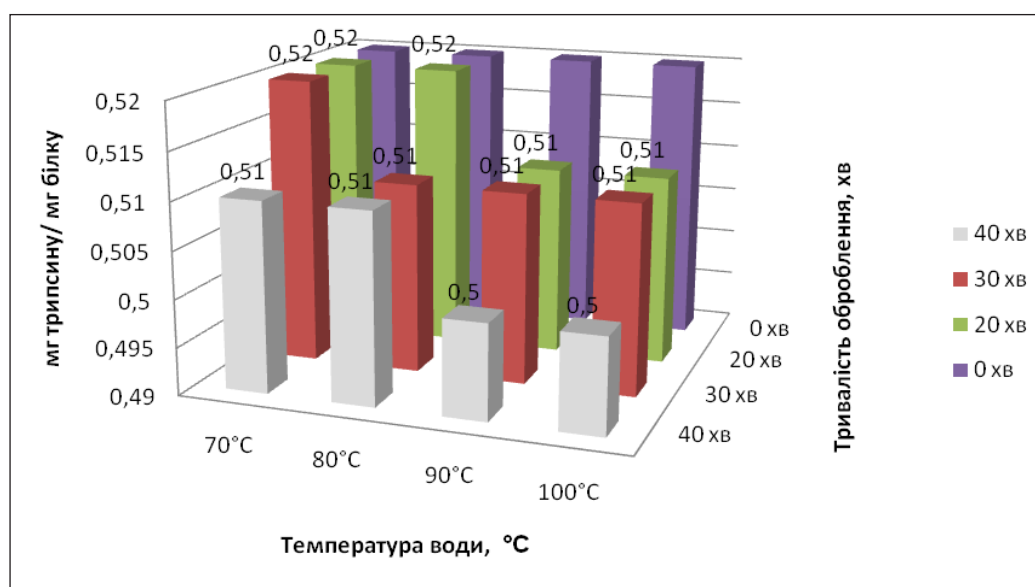


Рис. 1. Активність інгібіторів трипсину в зразках томатного насіння після застосування гідротермічного оброблення

З метою зниження активності інгібіторів протеїназ томатного насіння нами проведено підбір параметрів попередньої обробки томатного насіння та встановлено їх вплив на вміст біологічно активних речовин і трипсин-інгібуючу активність томатного насіння.

Ефективним шляхом усунення цих чинників є інактивація інгібіторів протеїназ, викликана їх руйнуванням. Слід зазначити, що, порівняно з іншими антиаліментарними факторами, інгібітори трипсину мають досить високу стійкість до інактивації. У зв'язку з цим дані про істотне зниження вмісту інгібіторів трипсину в продук-

тах переробки насіння свідчать і про деструкцію алкалоїдів.

Істотно знизити активність протеїназ (~ на 85%) можна за умови дії високих температур, особливо в поєднанні з підвищеним тиском. Збільшує ефективність термообробки також попереднє замочування насіння або зброджування. Поряд з інгібіторами трипсину руйнуються і деякі види гемаглютининів [11; 12].

Для визначення впливу гідротермічного оброблення на трипсин-інгібуючу активність томатного насіння нами проведено попередню їх обробку, що передбачала витримування у воді з

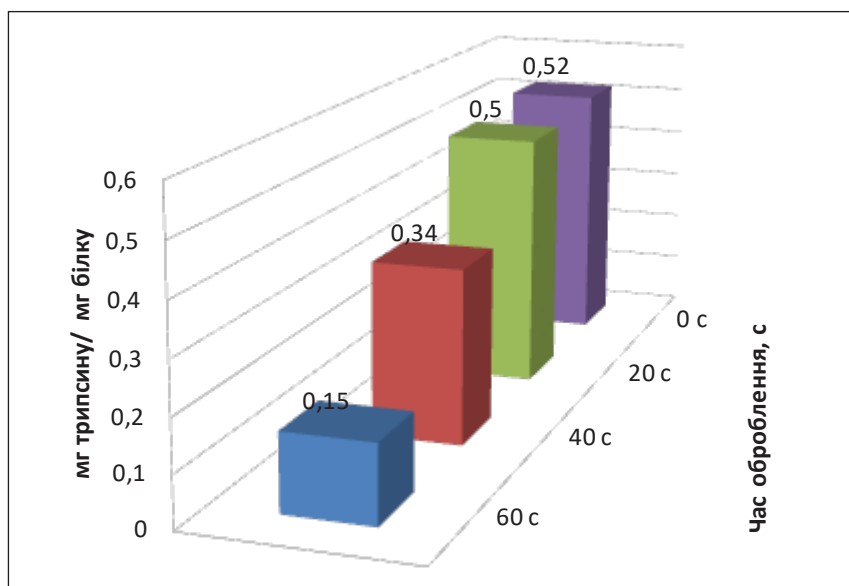


Рис. 2. Активність інгібіторів трипсину в зразках томатного насіння після застосування мікронізаційного оброблення

температурами 70; 80; 90; 100°C протягом 20; 30; 40 хв.

Вибір температури зумовлений білковою природою інгібіторів протеолітичних ферментів і їх здатністю інактивуватися під дією високих температур.

Результати проведених досліджень представлені на рис. 1.

Отримані дані свідчать, що застосування гідротермічного оброблення томатного насіння зі вказаними параметрами не дозволило істотно знизити трипсин-інгібуючу активність. Так, для зразків томатного насіння зниження трипсин-інгібуючої активності вдалося досягти лише шляхом витримування протягом 40 хв за температури 100°C. Слід зазначити, що отримані результати показують незначне зменшення трипсин-інгібуючої активності на рівні 2% та корелюються із контролем.

Проведені дослідження підтверджують наявні літературні дані щодо амінокислотного складу деяких інгібіторів трипсину [13]. Встановлено відсутність чи дуже низький вміст у них триптофану та метіоніну, а також високий вміст цистину (в деяких випадках – до 18%). Характерною особливістю цієї амінокислоти є наявність у її молекулі дисульфідних зв'язків, що зумовлює стійкість інгібіторів до дії температур і надає структурної жорсткості молекулам інгібіторів.

Один із перспективних напрямів у розробці енергозберігаючих технологій оброблення томатного насіння – використання нових фізичних мето-

дів підведення теплоти до продукту. Застосування інфрачервоного випромінювання інтенсифікує внутрішні процеси, покращує якісні показники, полегшує їх контроль і управління технологічними параметрами. Внаслідок ІЧ-оброблення відбувається інтенсифікація процесів біохімічних перетворень у насінні, внаслідок резонансного впливу поглинається енергія на зв'язку в молекулах біохімічних полімерів.

Мікронізація – процес термообробки, що використовує для енергопідводу випромінювання інфрачервоної (ІЧ) області спектра, т. зв. теплове випромінювання [14]. Мікронізоване томатне насіння має високі органолептичні показники. Щільність теплового потоку значно вища, ніж у разі конвективного і кондуктивного теплопідведення. Інфрачервоне випромінювання нагріває зерно і проникає в глибину шару матеріалу до 4–6 мм. Термодифузійний потік вологи з поверхні, що переходить у пару, створює внутрішній тиск і розпушує кожен окрему насінину. У зв'язку з цим обробка відбувається за мінімальний час, вміст протеїну в сухій речовині й амінокислотний склад практично не змінюються.

Результати проведених досліджень впливу мікронізаційної обробки на трипсин-інгібуючу активність томатного насіння представлені на рис. 2.

Отримані дані свідчать, що застосування мікронізаційного оброблення дозволяє досягти зменшення кількості антипоживних речовин томатного насіння. Так, після витримування в

мікронізаторі томатного насіння протягом 60 с зниження вмісту інгібіторів трипсину становило близько 34%.

Нагрівання томатного насіння до 40–60 с і витримання його в термостатичних умовах дозволяє досягти хорошого результату зменшення кількості інгібіторів трипсину в 4–8 разів. Нагрівання протягом понад 60 с призводить до різкої втрати розчинності томатного протеїну, що негативно позначається на його засвоюваності. Під час нагрівання понад 80 с відбувається деструкція білкових речовин і вуглеводів та утворення нерозчинних комплексів.

Оскільки такий спосіб має мінімальний час обробки порівняно з іншими способами, споживана потужність буде вищою. Однак за рахунок скорочення часу обробки енерговитрати можуть бути меншими, ніж у разі застосування інших способів.

Ще однією перевагою способу є збереження фізичної цілісності насіння, що збільшує терміни

зберігання обробленого томатного насіння. Істотним недоліком способу є нерівномірний прогрів внутрішньої частини насіння, оскільки прогрів за допомогою інфрачервоного теплоенергопідводу здійснюється зверху.

Висновки. Аналіз хімічного складу томатного насіння показав, що, незважаючи на високу біологічну цінність, харчову цінність насіння істотно знижують природні антимицозні речовини – інгібітори протеїназ. З метою інактивації до безпечного рівня проведено дослідження впливу попередньої обробки, а саме процесів мікронізації та гідротермічного оброблення томатного насіння. Встановлено, що гідротермічне оброблення з використанням температур у діапазоні 70–100°C знижує активність антипоживних речовин томатного насіння на 1–2%. Мікронізаційне оброблення томатного насіння протягом 60 с дозволяє досягти зниження вмісту інгібіторів трипсину на 34% без зміни властивостей білкових речовин та амінокислотного складу насіння.

Список літератури:

1. Гавриш С.Ф. Томат: обробка та переробка продукції. Продукти харчування. 2005. № 5. С. 15–18
2. Остриков А.Н., Гаджиева А.М., Касьянов Г.И. Комплексная технология переработки томатного сырья. Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2015. № 1 (63). С. 12–17.
3. Бендерська О.В. Огляд ринку томатних соусів в Україні. Научные труды SWorld. Иваново: Научный мир, 2016. Вып. 3 (44). Т. 3. С. 84–89.
4. Тоог Р.К. Зміна складу основних антиокислювачів при післязбиральному зберіганні томатів. Food Chem. 2006. № 4. С. 724–727.
5. Доссон Р., Элиот Д., Элиот У. Справочник биохимика. М.: Мир. 1991. С. 396.
6. Кретович В.Л. Биохимия растений. М.: Высшая школа. 1986. 503 с.
7. Benderska O., Bessarab A., Shutuyuk V. Study of the use of edible powders in tomato sauce technologies. Food science and technology. 2018. Vol. 12, Issue 2. P. 59–65. DOI: <http://dx.doi.org/10.15673/fst.v12i1.837>.
8. Сирохман І.В. Товарознавство харчових продуктів функціонального призначення. К.: Центр навчальної літератури, 2009. 544 с.
9. Сергеев В.Н., Кокаев Ю.И. Пищевая промышленность. 2001. № 6. С. 28–30.
10. Singleton V.L., Orthofer R., Lamuela-Raventos R.M. Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of Folin-Ciocalteu reagent. Methods Enzymol. 1999. № 299. P. 152.
11. Щеглова И.В., Верещагин А.Л. Влияние вакуумно-импульсной обработки грибов на аминокислотный состав и трипсинингибирующую активность. Техника и технология пищевых производств. 2010. № 1 (16). С. 25–28.
12. Титов А.Ф., Фролова С. А., Таланова В.В. Венжик Ю.В. Влияние фитогормонов на активность протеолитических ферментов и ингибиторов трипсина при холодной адаптации пшеницы. Труды Карельского научного центра Российской академии наук. 2011. № 3. С. 117–120.
13. Оробинская В.Н., Казуб В.Т., Коновалов Д.А. Электроразрядная обработка фактор регулирования активности ингибиторов растительного сырья. European science review. 2014. № 1–2. С. 154–162.
14. Чижикова О.Г., Павлова М.А., Коршенко Л.О. Разработка оптимальных режимов получения паст на основе семян чечевицы. Дальневосточный аграрный вестник. 2017. № 3 (43). С. 177–182. DOI: 10.24411/1999-6837-2017-00073.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПИЩЕВОЙ И БИОЛОГИЧЕСКОЙ ЦЕННОСТИ ВТОРИЧНЫХ ТОМАТНЫХ РЕСУРСОВ

В статье приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований биологической ценности томатных семян. Установлено, что семена томатов имеют высокую пищевую и биологическую ценность, которая обусловлена повышенным содержанием белков, липидов, углеводов и приближена к современным рекомендациям относительно создания рационов здорового питания населения. Также семена томатов богаты полиненасыщенными жирными кислотами, фосфолипидами, макро- и микроэлементами, витамином E, клетчаткой. Однако их пищевую ценность в значительной степени снижают природные биологически активные антиалиментарные вещества – ингибиторы протеиназ. Авторами исследовано содержание и активность антипитательных веществ томатных семян и предложены пути снижения их активности. Актуальность представленных исследований заключается в расширении возможности применения вторичного томатного сырья, а именно томатных семян в технологиях консервированных продуктов с повышенной биологической ценностью.

Ключевые слова: томаты, протеиназы, соус, семена, инактивация, трипсин.

SOME ASPECTS OF SECONDARY TOMATO RAW MATERIAL IN FOOD TECHNOLOGY

The article presents the results of theoretical and experimental studies of the biological value of tomato seeds. It has been found that tomato seeds have a high nutritional and biological value due to the high concentration of proteins, lipids, and carbohydrates. Accordingly, this value complies with modern recommendations on healthy diet for the population. Also, tomato seeds are rich in polyunsaturated fatty acids, phospholipids, macro- and micronutrient elements, vitamin E, and fiber. However, its nutritional value is substantially reduced by natural biologically active anti-alimentary substances, namely proteinase inhibitors. The purpose of this paper is the study of chemical composition and biological value of secondary tomato resources, namely tomato seeds, as well as researching the possibility of its application in food technology. It is also concerned with determination of quantitative and qualitative composition of anti-nutrients of tomato seeds and selection of ways to decrease the activity of anti-nutrients of tomato seeds.

Key words: tomatoes, proteinases, sauce, seeds, inactivation, trypsin.

УДК 544.022.822:637.344.002.64

Гринченко Н.Г.

Харківський державний університет харчування та торгівлі

Пивоваров П.П.

Харківський державний університет харчування та торгівлі

Ботштейн Б.Б.

Харківський державний університет харчування та торгівлі

ТЕХНОЛОГІЯ ПРОДУКТУ КАПСУЛЬОВАНОГО НА ОСНОВІ СИРОВАТКИ МОЛОЧНОЇ

Доведено перспективність розробки технології продукту капсульованого на основі сироватки молочної. Висвітлено проблемні питання переробки сироватки, сучасний рівень її використання в технології харчової продукції. На підставі експериментальних досліджень і технологічних відпрацювань визначено раціональні параметри одержання нової продукції. Розроблено структуру технологічної системи виробництва продукту капсульованого на основі сироватки молочної, визначено мету функціонування її підсистем. Розроблено технологічний процес виробництва продукту капсульованого, внутрішнім вмістом якого є сироватка молочна, а оболонкоутворювачем – іонотропний полісахарид (альгінат натрію).

Ключові слова: технологія, сироватка молочна, капсулювання, іонний кальцій, альгінат натрію, інкапсулянт.

Постановка проблеми. Харчова промисловість є важливою складовою частиною аграрного сектору економіки України, яка відіграє провідну роль у забезпеченні населення харчовими продуктами в асортименті й обсягах, достатніх для формування збалансованого харчового раціону. Не є винятком і молочна промисловість, стратегічними завданнями розвитку якої є посилення інноваційної діяльності, розробка та запровадження інноваційних і ресурсозберігаючих технологій, систем управління якістю (ISO 9001), безпечністю (ISO 22000), екологічного менеджменту (ISO 14000), підвищення конкурентоспроможності продукції на внутрішньому і зовнішньому ринках.

З огляду на зазначене особливої актуальності набуває розробка технології продукту капсульованого на основі сироватки молочної (далі – ПКСМ), яка, як вторинна сировина, накопичується у великих обсягах під час виробництва білкових продуктів. Згідно зі статистичними даними, за останні роки на підприємствах України одержано 3 230 тис. тонн молочної сироватки, з них 504 тис. тонн (15,6%) перероблено та реалізовано у вигляді сухої сироватки, 216 тис. тонн (6,7%) реалізовано у рідкому вигляді, а 2 510 тис. тонн (77,7%)

потрапило до стічних вод [1, с. 23]. Тож залучення молочної сироватки до технологічного процесу виробництва капсульованої продукції в межах реалізації міжгалузевої кооперації «молочна промисловість – ресторанний бізнес» дозволить підприємствам молочної промисловості одержати суттєву економію матеріальних ресурсів, підвищити рівень замкненості виробничо-ресурсних циклів у галузі, мінімізувати забруднення навколишнього природного середовища; для ресторанного бізнесу – одержати продукцію з новими споживними властивостями (харчовою цінністю, смаковими властивостями, ціновою доступністю, строками зберігання) для широких верств населення України.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Під час виробництва сиру, казеїну або білкових концентратів відбувається поділ молока на білково-жирові або білкові концентрати й безказеїнову фазу – сироватку молочну [2, с. 105]. Склад останньої зумовлений видом основного продукту і технологією його одержання. Вихід сироватки молочної становить 70...80% від кількості переробленого молока. Її обмежене застосування в харчовій промисловості пояснюється невисокими

органолептичними показниками (кислий смак і зеленувато-жовтий колір); низька ціна призводить до викидів сироватки в каналізацію.

Біологічна цінність сироватки молочної визначається вмістом у ній білкових азотистих речовин, які переважно представлені лактоальбуїнами (0,4...0,5%), лактоглобуїнами (0,06...0,08%), протеозо-пептонною фракцією (0,06...0,18%), а також вуглеводами (3,2...5,1%), ліпідами (0,05...0,4%), мінеральними солями (0,5...0,8%), вітамінами, органічними кислотами, ферментами [3, с. 23–24]. Регулярне вживання сироватки молочної сприяє покращенню роботи нирок та нормалізації функції печінки людини, стимулює діяльність кишечника, зменшення запальних процесів в організмі. Енергетична цінність (близько 20 ккал на 100 г) сироватки молочної, одержаної під час виробництва сиру кисломолочного, в 3,5 разів менша, ніж у нормалізованому молоці, що дозволяє розглядати її як біологічно цінний продукт із дієтичними властивостями [4].

В Україні за останні роки асортимент продукції з використанням сироватки молочної дещо виріс. На підприємствах харчової промисловості виробляються сироватка згущена, концентрована, суха, напої на основі сироватки молочної, альбумінове молоко й альбуміновий сир кисломолочний, молочний цукор, спирт із сироватки молочної, а на його основі – винні напої [5, с. 81].

У роботах [6, с. 15; 7, с. 328] висвітлено сучасний стан використання сироватки молочної в технології харчової продукції. Найбільш перспективним є модернізація виробництва із залучення до технологічних процесів сучасного обладнання і технологій обробки сировини. Так, мембранні установки та ферментативний гідроліз лактози дають можливість одержувати різні види згущеної або сухої демінералізованої сироватки та її похідних. Встановлено, що найбільш сучасними методами переробки сироватки молочної є комбіновані схеми з використанням мембранних технологій, ферментативної обробки компонентів, а також сушіння концентрованих проміжних продуктів. Завдяки цим технологіям одержують різні види сироватки, ізоляти сироваткових білків (далі – ІСБ), концентрати сироваткових білків (далі – КСБ), молочний цукор, лактозу та інші компоненти.

Відомий спосіб одержання сухого білково-рослинного напівфабрикату [8, с. 2] з молочної сироватки багатofункціонального призначення, що містить молочну сироватку, стабілізатор – гуарову камедь – і рослинну сировину – кропиву та спориш. Така технологія дозволяє розширити асортимент

страв закладів ресторанного господарства, підвищити їх харчову та біологічну цінність, раціонально використовувати есенціальні складові компоненти молока, сприяє впровадженню мало-відходних ресурсозберігаючих технологій у молокопереробній промисловості.

Авторами [9, с. 2] розроблено нові технологічні рішення щодо створення збитого десерту на основі сироватки молочної, що включає харчові волокна Citri-Fi. Із метою зниження калорійності десерту замість сахарози використовується фруктоза. Виробництво десертів на основі вторинної молочної сировини дозволяє знизити їх собівартість і збільшити кількість сироватки, що переробляється на харчові цілі.

Частково проблема переробки сироватки молочної вирішується за рахунок випуску напоїв на її основі [10, с. 322; 11, с. 37]. Сьогодні в Україні в цьому сегменті переробляється близько 1,5% сироватки від загального її об'єму.

Відомий спосіб переробки сироватки з одержанням імітаторів жиру [12, с. 54]. Розроблено технологію виробництва мікропартикуляту концентрованих сироваткових білків термокислотним способом з метою його використання в технології харчової продукції. Такий підхід дозволяє розширити асортимент продукції зниженої калорійності, підвищити її харчову та біологічну цінність, зменшити собівартість і забезпечити екологічну чистоту виробництва.

Окрім молочної промисловості, сироватка молочна широко використовується в інших галузях харчової промисловості. Вченими [13, с. 47] досліджено процес одержання мікрокапсул на основі низькометоксильованих пектинів із яблук, цитрусових із концентратом білків молочної сироватки. Мікрокапсули одержують методом двостадійного формування емульсії масло : вода за присутності іонів натрію. Такий продукт, одержаний із харчових біополімерів (білки та полісахариди), має широку область застосування в харчових, фармацевтичних і профілактичних продуктах.

Узагальнюючи наведені дані, слід зазначити, що більшість наявних технологій переробки сироватки молочної не можуть бути покращені на макрорівні, оскільки досягли природної межі удосконалення. У зв'язку з цим доцільним є використання технологічних властивостей речовин, що входять до складу сироватки, зокрема кальцію, який перебуває в іонному стані. Одним із таких шляхів, що дозволить розширити асортимент та одержати продукти з новими споживчими властивостями, є використання сироватки молочної як

Раціональні параметри одержання ПКСМ

Найменування параметра	Одиниці вимірювання	Межові значення
Концентрація іонів кальцію в інкапсулянті	мг%	$\geq 20,0$
Масова частка сироватки в інкапсулянті	%	≥ 50
Концентрація розчину AlgNa	%	1,0...2,0
Тривалість капсулювання	с	$(1,5...5,0) \times 60$
Співвідношення оболонка : інкапсулянт	–	$(10...30) : (70...90)$
Масова частка солі кухонної у розсолі	%	3,0...3,5
Тривалість посолу	с	$(1,0...1,5) \times 602$
Температура пастеризації	°C	80...85
Тривалість пастеризації	с	$(15...20) 60$

основної сировини для виробництва капсульованих продуктів на її основі.

Постановка завдання. Метою досліджень, які викладено в нашій статті, є розробка технології продукту капсульованого на основі сироватки молочної. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- визначити раціональні параметри технологічного процесу виробництва ПКСМ;
- розробити структуру технологічної системи виробництва ПКСМ та визначити мету функціонування її підсистем;
- розробити технологічну схему виробництва ПКСМ.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Аналіз фізико-хімічних основ капсулювання та сучасний рівень наукових досліджень за цим напрямом [14, с. 47] дозволяє прогнозувати доцільність використання сироватки молочної як джерела іонного кальцію. Для створення капсул перспективним є використання альгінату натрію як плівкоутворюючої речовини, яка за рахунок перебігу іонообмінної реакції утворює міцні еластичні гелі з низькою хімічною активністю та розчинністю у воді, що є передумовою для утворення оболонки капсули.

В основі процесу капсулювання, а саме заключення речовин в оболонку, що виконує функцію роз'єднання часточок одна від одної й ізолювання їх від зовнішнього середовища, лежать процеси фазового роз'єднання рідина – рідина, реакції зшивання полімерів, поліконденсації та полімеризації на межі поділу фаз. Наслідком зазначених процесів є формування капсул, що є двофазними системами і складаються з оболонки (переважно твердої чи желеподібної) та внутрішнього вмісту, який може перебувати у будь-якому агрегатному стані [15, с. 51–52].

Узагальнення експериментальних даних з обґрунтування технологічних параметрів одержання

ПКСМ, комплексне дослідження формування його органолептичних, фізико-хімічних і структурно-механічних показників у технологічному потоці стали підґрунтям розробки моделі технологічної системи виробництва ПКСМ та визначення раціональних параметрів його одержання (табл. 1).

Відповідно до інноваційного задуму нової продукції, здійснено технологічні відпрацювання, спрямовані на обґрунтування рецептурного складу ПКСМ та технологічних параметрів його виробництва, що стало передумовою розробки структури технологічної системи виробництва ПКСМ (рис. 1).

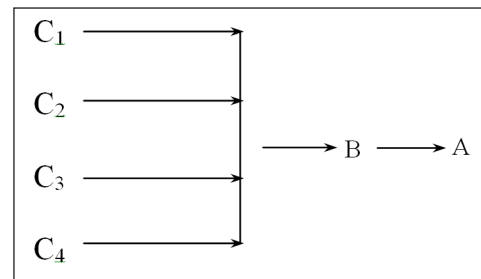


Рис. 1. Структура технологічної системи виробництва ПКСМ (C_1, C_2, C_3, C_4, V, A – підсистеми)

Технологію виробництва нової продукції представлено як цілісну систему, в межах якої виділено підсистеми – ($C_1 - C_4$), V, A , – функціонування яких спрямовано на одержання кінцевого результату функціонування – одержання ПКСМ. Мету функціонування окремих підсистем у межах технологічної системи виробництва ПКСМ наведено в табл. 2.

Технологічну схему виробництва ПКСМ наведено на рис. 2.

У межах підсистеми C_1 здійснюються технологічні операції, які спрямовано на одержання структурної основи – сирно-сироваткової суміші,

Структура технологічної системи та мета функціонування її підсистем

Позначення підсистеми	Найменування підсистеми	Мета функціонування підсистеми
A	ПКСМ	Утворення ПКСМ
B	Капсули у розсолі пастеризовані	Одержання капсул на основі сироватки молочної й альгінату натрію шляхом послідовної реалізації технологічних операцій, формування структури нової продукції, забезпечення показників якості та безпечності протягом визначеного строку зберігання
C1	Напівфабрикат «Сирно-сироваткова суміш»	Утворення проміжного напівфабрикату, який, з одного боку, є джерелом іонного кальцію, а з іншого, – структурною основою нової продукції та визначає її харчову і біологічну цінність
C2	Напівфабрикат «Суміш суха»	Утворення проміжного напівфабрикату суміші сухих інгредієнтів, що забезпечують можливість регулювання текстурних характеристик нової продукції
C3	Напівфабрикат «Розчин AlgNa»	Утворення розчину альгінату натрію, який виконує роль оболонкоутворювача в технологічному процесі
C4	Напівфабрикат «Розсіл для посолу капсул»	Утворення розсолу, використання якого забезпечує корегування органолептичних і структурно-механічних характеристик ПКСМ

шляхом проціджування сироватки та перемішування з напівфабрикатом із сиру кисломолочного до рівномірного розподілу компонентів. Використання напівфабрикату з сиру кисломолочного дозволяє регулювати харчову та біологічну цінність готової продукції. Головною функцією сироватки у цьому технологічному процесі (окрім формування харчової цінності) є збагачення суміші для капсулювання на іонний кальцій, що є умовою реалізації процесу капсулювання. Оскільки рН сироватки молочної знаходиться в інтервалі 4,3...4,5, то більшість солей кальцію дисоціюють з утворенням певної кількості іонного кальцію (близько 70...80 мг%), що є достатньою для перебігу реакції іонообміну з утворенням іонотропного гелю (оболонки капсули).

Функціонування підсистеми C_2 спрямовано на одержання н/ф «Суміш суха» шляхом перемішування окремих сухих компонентів до рівномірного їх розподілу. Слід зазначити, що введення визначених рецептурних компонентів (крохмаль модифікований, камідь ксантанова, каррагінан) дозволяє повною мірою скорегувати структурно-механічні показники як рецептурної суміші для капсулювання, так і капсульованого напівфабрикату, а також готової продукції. Зокрема, введення ксантанової камеді дозволяє регулювати в'язкість суміші для капсулювання, що дає можливість одержання капсульованої продукції з розмірними характеристиками 0,5...2,5 мм. Функціонально-технологічні властивості крохмалю модифікованого реалізуються на етапі здійснення пастеризації напівфабрикатів капсульованих. За рахунок

клейстеризації відбувається формування текстурних властивостей внутрішнього вмісту капсули. Введення карагінану до складу рецептурних компонентів зумовлено його властивістю під час охолодження (після проведення пастеризації) утворювати гелеподібну текстуру з характерним «сколом», що у поєднанні з крохмалем модифікованим дозволяє створити унікальну консистенцію капсульованої продукції.

У межах підсистеми C_3 здійснюються технологічні операції, які спрямовано на одержання н/ф «Розчин AlgNa» (оболонкоутворювач) шляхом диспергування наважки AlgNa у воді питній підготовленій за температури 78...80°C упродовж (3...4)·60 с із подальшим витриманням протягом 24·60²с.

У межах підсистеми B здійснюються технологічні операції, спрямовані на одержання капсул і їх пастеризації у розсолі. Підготовлену суміш піддають капсулюванню шляхом дозування дози-краплі сироваточної суміші в отриманий розчин оболонкоутворювача (альгінату натрію), внаслідок чого одержують капсули з термостабільною полісахаридною оболонкою. Капсулоутворення відбувається за рахунок протікання реакції іонообміну між іонами Na^+ , джерелом яких є розчин оболонкоутворювача, та іонами Ca^{2+} , які достатньою мірою знаходяться у сирно-сироваткової суміші, що піддають капсулюванню. Одержані капсули промивають проточною водою, розфасовують у тару та заливають розсолем із подальшою пастеризацією за температури 80...85°C протягом 20...25 хв, що забезпечує формування органолеп-

тичних і структурно-механічних показників капсульованої продукції, а також забезпечує мікробіологічну стабільність впродовж зберігання.

Підсистему А спрямовано на одержання ПКСМ. У межах підсистеми здійснюється маркування продукції, зберігання та її реалізація.

Поряд із розробкою технологічної схеми виробництва ПКСМ та її апробацією у вироб-

ничих умовах здійснено комплексну оцінку показників якості та безпечності нової продукції. Експертами підтверджено високі органолептичні властивості (під час дегустації новий продукт набрав максимальну кількість балів) ПКСМ. Це свідчить про те, що технологія є перспективною і потребує подальшого розвитку й упровадження.

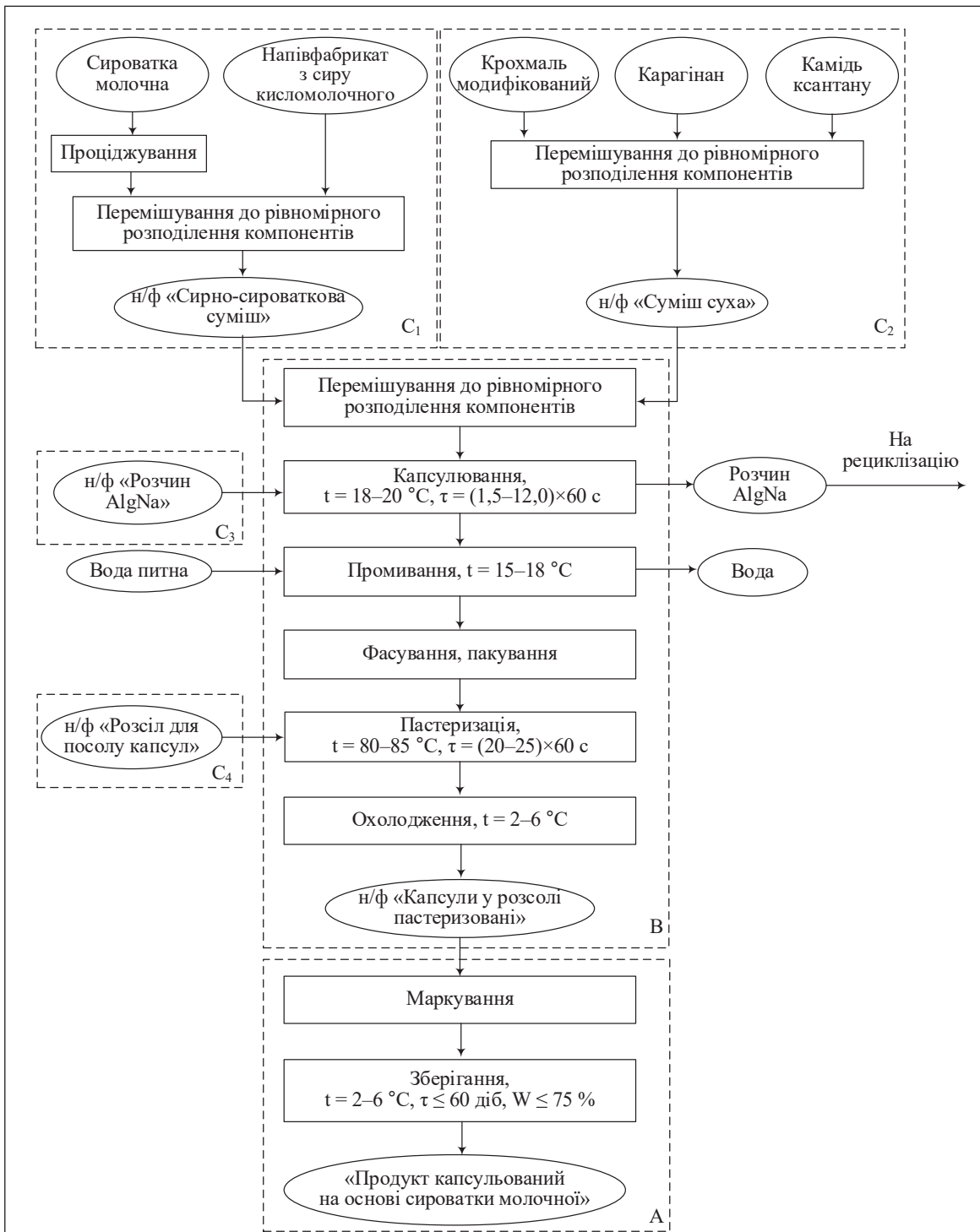


Рис. 2. Технологічна схема виробництва ПКСМ

Висновки.

1. Доведено перспективність розробки технології ПКСМ, реалізація якої дозволить підприємствам молочної промисловості одержати суттєву економію матеріальних ресурсів, підвищити рівень замкненості виробничо-ресурсних циклів у галузі, мінімізувати забруднення навколишнього природного середовища; закладам ресторанного бізнесу – одержати продукцію з новими споживними властивостями (харчовою цінністю, смаковими властивостями, ціною доступністю, строками зберігання) для широких верств населення України.

2. Визначено раціональні параметри одержання продукту капсульованого на основі сироватки молочної, доведено, що мінімальна концентрація іонів кальцію в інкапсулянті для процесу

капсулювання складає 20 мг%, тобто масова частка сироватки в інкапсулянті має складати не менше 50%, а тривалість капсулювання складає $(1,0 \dots 5,0) \times 60$ с.

3. На підставі узагальнення результатів аналітичних та експериментальних досліджень розроблено структуру технологічної системи та визначено мету функціонування її підсистем. Доведено, що функціонування системи в цілому забезпечується функціонуванням окремих її складових частин відповідно до мети.

4. Розроблено технологічну схему виробництва ПКСМ – капсул у розсолі, пастеризованих, внутрішнім вмістом яких є сироватка молочна з додаванням додаткових рецептурних компонентів. Оболонку капсули сформовано на основі іонотропного полісахариду альгінату натрію.

Список літератури:

1. Пастернак Н. Экспортні потоки молочної продукції, або Куди течуть молочні ріки? Молочна промисловість. 2007. № 1. С. 16–20.
2. Кузнецов В.В., Шилер Г.Г. Справочник технолога молочного производства. Технология и рецептуры. Т. 3. Сыры. СПб: ГИОРД, 2003. 467 с.
3. Храмов А. Г. Феномен молочной сыворотки: монография. СПб: Профессия. 2011. 804 с.
4. Користь молочної сироватки для організму. URL: <http://diagnoz.net.ua/diagnoz/10043-korist-molochnoyi-sirovatki-dlya-organizmu.html>.
5. Мусійчук О. Перспективи використання продуктів переробки молочної сироватки. Товари і ринки. 2008. № 1. С. 78–83.
6. Tolkach A., Kulozik U. Fractionation of whey proteins and caseinomacropeptide by means of enzymatic crosslinking and membrane separation techniques. Journal of Food Engineering. 2005. Т. 67. № 1–2. С. 13–20.
7. Atra R., Vatai G., Bekassy-Molnar E., Balint A. Investigation of ultra- and nanofiltration for utilization of whey protein and lactose. Journal of food engineering. 2005. Т. 67. № 3. С. 325–332.
8. Сухий білково-рослинний напівфабрикат з молочної сироватки багатофункціонального призначення: патент на корисну модель № 51867, Україна, МПК А 23 G 9/00 // Коршунова Г.Ф., Гніцевич В.А., Федотова Н.А.; у 2012107483/13; заявл. 27.03.2012; опубл. 10 грудня 2013 р.
9. Плеханова Е.А., Банникова А.В., Шестопалова Н.Е., Птичкина Н.М. Взбитый десерт на основе молочной сыворотки с пищевыми волокнами CITRI-FI. Техника и технология пищевых производств. 2014. № 1. С. 73–76.
10. Djurić M., Carić M., Milanović S., Tekić M., Panić M. Development of whey-based beverages. European Food Research and Technology. 2004. Т. 219. № 4. С. 321–328.
11. Мельникова Е.И., Богданова Е.В., Фисенко М.О., Коренман Я.И., Нифталиев С.И. Новые модифицированные формы творожной сыворотки в технологии напитков. Пищевая технология. 2014. № 4. С. 37–39.
12. Дідух Г.В. Отримання мікропартикуляту з концентрату білків молочної сироватки. Харчова наука і технологія. 2015. № 2. С. 52–56.
13. Шамсара О., Мухидинов З.К., Бобокалонов Д.Т., Усманова С.Р., Лиу Л.Ш. Микрокапсулы на основе низкометиловых пектинов и концентрата белков молочной сыворотки. Переработка молока. 2014. Т. 57. № 1. С. 44–49.
14. Рябець О.Ю. та ін. Наукові принципи технології аналогів ікри: монографія. Харків: ХДУХТ, 2010. 164 с.
15. Пивоваров П.П. Звіт з науково-дослідної роботи № 24-08-10 Б (0107U010129) «Наукові основи технології реструктурованої продукції, одержаної шляхом іонотропного гелеутворення». Х.: ХДУХТ, 2010. 186 с.

ТЕХНОЛОГИЯ ПРОДУКТА КАПСУЛИРОВАННОГО НА ОСНОВЕ СЫВОРОТКИ МОЛОЧНОЙ

Доказана перспективность разработки технологии продукта капсулированного на основе сыворотки молочной. Освещены проблемные вопросы по переработке сыворотки, современный уровень ее использования в технологии пищевой продукции. На основании экспериментальных исследований и технологических отработок определены рациональные параметры получения новой продукции. Разработана структура технологической системы производства продукта капсулированного на основе сыворотки молочной, определены цели функционирования ее подсистем. Разработан технологический процесс производства продукта капсулированного, внутренним содержанием которого является сыворотка молочная. Оболочка сформирована на основе ионотропного полисахарида (альгината натрия).

Ключевые слова: технология, сыворотка молочная, капсулирование, ионный кальций, альгинат натрия, инкапсулянт.

TECHNOLOGY OF THE PRODUCT ENCAPSULATED ON THE BASIS OF THE MILK WHEY

The prospects of development of the technology of encapsulated products based on milk whey are proved. The problem issues concerning the processing of whey and, the modern level of its use in food technology are highlighted. Based on the results of analytical and experimental studies, technological outsourcing the rational parameters of obtaining a new product is substantiated. The structure of the technological system is developed and the purpose of the functioning of its subsystems is determined. A technological process for the production of a capsular; which internal content is milk whey, is developed, and the capsule shell is formed on the basis of ionotropic polysaccharide (sodium alginate).

Key words: technology, milk whey, encapsulation, ionic calcium, sodium alginate, encapsulant.

УДК 664.87

Сагайдак М.Є.

Львівський державний коледж харчової і переробної промисловості

Бліщ Р.О.

Львівський торговельно-економічний університет

Прибильський В.Л.

Національний університет харчових технологій

ВИКОРИСТАННЯ СУХИХ ПРЕПАРАТІВ МОЛОЧНОКИСЛИХ БАКТЕРІЙ ДЛЯ ЗБРОДЖУВАННЯ КВАСНОГО СУСЛА

Вивчено фізико-хімічну та фізіологічну характеристики сухих препаратів молочнокислих бактерій VIVO. Досліджено динаміку зміни концентрації сухих речовин і титрованої кислотності за різних умов збродження сусла. Встановлено, що дріжджі здатні зброджувати квасне сусло за наявності непритаманних для квасоваріння культур молочнокислих бактерій. Доведено, що в разі використання Ацидолакту VIVO, Йогурту VIVO та Квасу VIVO за температури 3°C процес бродіння скорочується на 3...5 год. порівняно процесом за температури 30°C. Визначена доцільність проведення подальших досліджень із використанням таких бактерій у виробництві квасу.

Ключові слова: молочнокислі бактерії, закваска, дріжджі, сусло, бродіння, кислотність.

Постановка проблеми. Аналіз стану світового виробництва напоїв загальнооздоровчої дії свідчить про те, що розвитку даної галузі не приділялося належної уваги, зокрема щодо галузі технології ферментованих напоїв. Оздоровча дія таких напоїв пояснюється наявністю корисних для людини мікроорганізмів, біологічно активних речовин, які утворюються в процесі їхньої життєдіяльності. Широкий спектр їх якісного складу дозволяє поповнити організм людини дефіцитними біологічно активними речовинами. Тому проблема створення і виробництва безалкогольних напоїв загальнооздоровчого призначення має велике значення в розвитку харчової промисловості.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання підбору, виділення і дослідження штамів мікроорганізмів для виробництва ферментованих напоїв посідає ключове місце у створенні нових біотехнологій. Варто сказати, що на більшості підприємств використовують або пресовані хлібопекарські дріжджі, що не адаптовані до технології квасоваріння, або комбіновану закваску із дріжджів *Saccharomyces cerevisiae* рас М або С-2 і молочнокислих бактерій роду *Betabacterium* 11 і 13, які були виділені ще в минулому столітті [1, с. 218].

За такий тривалий термін культивування вони втратили свої технологічні якості: бродильну активність, синтез незамінних амінокислот і інших біологічно активних речовин, швидкість розмноження тощо. У технології хлібного квасу як ферментованого напою, крім дріжджів, використовуються і молочнокислі бактерії, які суттєво впливають на фізико-хімічні й органолептичні властивості готового продукту.

Тому підбір нових культур молочнокислих бактерій дозволить підвищити якість і конкурентоспроможність хлібного квасу на ринку.

За результатами теоретичних досліджень можливості використання різних сухих препаратів молочнокислих бактерій встановлено, що за фізіологічними характеристиками доцільно використовувати сухі закваски молочнокислих бактерій VIVO. Їхня характеристика за ТУУ15.5–306030036–001:2009 наведена в таблиці.

Постановка завдання. Мета статті – дослідити використання сухих препаратів молочнокислих бактерій для виробництва хлібного квасу.

Матеріали і методи. Для приготування сусла використовували питну воду, концентрат квасного сусла та цукор-пісок згідно з нормативною документацією. Квасне сусло зброджували куль-

Склад та характеристика заквасок

№ п/п	Назва	Видовий склад	Характеристика
1.	Ацидолакт VIVO	<i>Lactobacillus acidophilus</i> , <i>Streptococcus salivarius</i> subsp. <i>termophilus</i> , <i>Lactococcus lactis</i> subsp. <i>diacetylactis</i> .	Рекомендована для вживання після антибіотиків або хіміотерапевтичних препаратів як підтримка мікрофлори організму. Бактерії, що входять до її складу, стійкі до більшості видів антибіотиків, здатні пригнічувати розвиток хвороботворних мікроорганізмів. Має комплексну протизапальну дію, нейтралізує токсини та побічні дії харчових продуктів, активізує процеси очищення організму.
2.	Йогурт VIVO	<i>Streptococcus salivarius</i> subsp. <i>termophilus</i> , <i>Lactobacillus</i> <i>delbrueckii</i> subsp. <i>vulgarricus</i> , <i>Lactobacillus acidophilus</i> , <i>Lactococcus lactis</i> subsp. <i>lactis</i> , <i>Lactococcus lactis</i> subsp. <i>diacetylactis</i> , <i>Lactococcus lactis</i> subsp. <i>cremoris</i> .	Корисна для людей різного віку. Споживання продукту з такими мікроорганізмами покриває потребу організму в амінокислотах, солях кальцію, вітамінах та інших корисних речовинах. Особливо корисна для людей із підвищеними фізичними чи психологічними навантаженнями. Продукт нормалізує травлення, сприяє виведенню з організму шкідливих речовин, зміцнює імунітет. Бактерії виробляють значну кількість молочної кислоти, що пригнічує розвиток хвороботворних бактерій.
3.	Квас VIVO	<i>Lactobacillus acidophilus</i> , <i>Streptococcus salivarius</i> subsp. <i>termophilus</i> , мікрофлора кефірних грибків, дріжджі хлібопекарські сушені.	Продукт нормалізує травлення, сприяє виведенню з організму шкідливих речовин. Наявність кефірного грибка надає продукту властивості загоювати рани, відновлювати мікробіоценоз у кишківнику, рекомендується для лікування хворих на гастрит і коліт, сприяє омолодженню організму.
4.	Біфівіт VIVO	<i>Acetobacter aceti</i> , <i>Bifidobacterium</i> <i>bifidum</i> , <i>Bifidobacterium longum</i> , <i>Bifidobacterium adolescentis</i> , <i>Lactococcus lactis</i> ssp. <i>cremoris</i> , <i>Lactococcus lactis</i> ssp. <i>diacetylactis</i> , <i>Propionibacterium</i> <i>freudenreichii</i> .	Ефективна в профілактиці та лікуванні різних захворювань шлунково-кишкового тракту, стафілокової інфекції, алергії, респіраторних захворювань, порушень імунітету й обміну речовин. Відновлює здорову мікрофлору кишківника в разі дисбактеріозу.
5.	Стрептосан VIVO	<i>Streptococcus salivarius</i> subsp. <i>termophilus</i> , <i>Enterococcus faecium</i> .	Культури входять до складу мікрофлори кавказьких молочнокислих продуктів – мацоні, сулугуні. Продукт має здатність протистояти збудникам кишкових інфекцій та гнилісним бактеріям, нормалізує обмін речовин роботу серцево-судинної системи, запобігає передчасному старінню організму.

турою дріжджів *Saccharomyces cerevisiae* A 01/06 із сухими препаратами молочнокислих бактерій VIVO. Вміст сухих речовин визначали ареометричним методом, титровану кислотність – титруванням розчином гідроксиду натрію концентрацією 0,1 моль/дм³.

Виклад основного матеріалу дослідження. Для дослідження готували 5 зразків стерильного квасного сусла, водних суспензій із сухих хлібопекарських дріжджів і заквасок молочнокислих бактерій:

- зразок № 1 – Ацидолакт VIVO;
- зразок № 2 – Йогурт VIVO;
- зразок № 3 – Квас VIVO;
- зразок № 4 – Біфівіт VIVO;
- зразок № 5 – Стрептосан VIVO.

У зразки № № 1, 2, 4, 5 вносили суспензію дріжджів із розрахунку 4% від об'єму сусла. У зразок № 3 дріжджі не додавали.

Суспензії молочнокислих бактерій вносили в співвідношенні до дріжджової суспензії як 1 : 2,5.

Початкові показники квасного сусла: вміст сухих речовин – 3,3%, кислотність – 1,15 см³ розчину NaOH концентрацією 1,0 моль/дм³ на 100 см³.

Враховуючи відмінність у фізіологічно різних оптимальних температурних режимах для дріжджів та молочнокислих бактерій, процес бродіння здійснювали за температури 30°C і 36°C. Тривалість бродіння – до 24 годин.

Закінченим бродіння вважали в разі зменшення вмісту сухих речовин на 0,8...1,0% за зростання титруємої кислотності 2,0...2,5 см³ розчину

NaOH концентрацією 1,0 моль/дм³ на 100 см³ середовища.

Під час бродіння сусла визначали зміну концентрації сухих речовин та титровану кислотність.

Динаміка зміни концентрації сухих речовин квасного сусла за температури бродіння 30°C наведена на рис. 1.

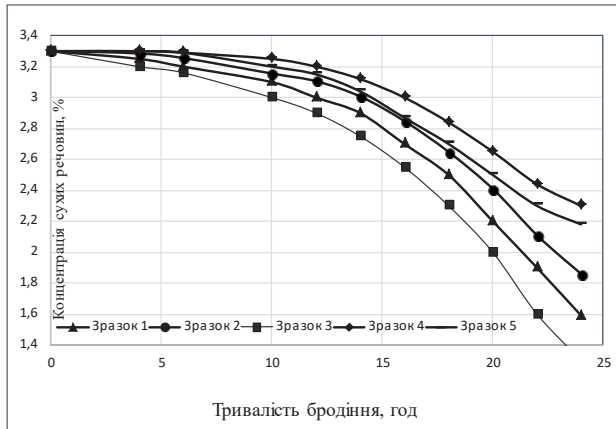


Рис. 1. Динаміка зміни вмісту сухих речовин за температури 30°C

Встановлено, що в перші 2,0...5,0 год. зниження концентрації сухих речовин у зразках № № 1, 2, 4 і 5 було несуттєвим, що свідчить про адаптацію дріжджів до умов середовища в лаг-фазі розвитку. Під час зброджування зразка № 3 періоду лаг-фазі практично не спостерігали. Необхідних показників сусло набуло за 16 год. Тривалість бродіння зразків № № 1, 2, 4 і 5 становила відповідно 17,5; 19; 22 та 20 год.

Зміну титрованої кислотності сусла за температури бродіння 30°C наведено на рис. 2.

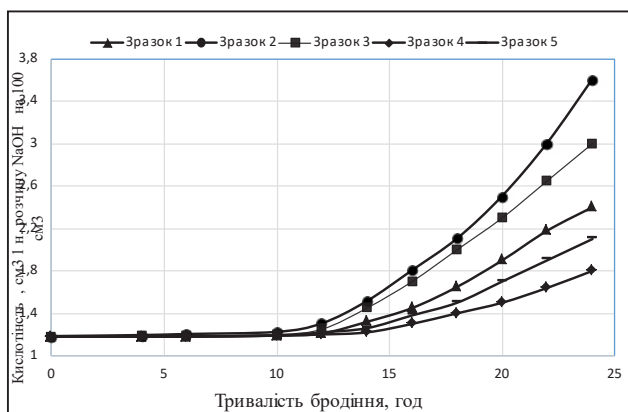


Рис. 2. Динаміка зміни титрованої кислотності за температури 30°C

Під час порівняння динаміки зміни показників кислотності зазначена низька швидкість кислотоутворення в усіх зразках. Найшвидше необхідної кис-

лотності досягнуто в зразках № 2 і № 3, що можна пояснити наявністю в їхньому складі культур молочнокислих бактерій із мезофільними властивостями.

Отже, зброджування квасного сусла за 30°C відбувалося помірно, зі зниженням початкової концентрації сухих речовин на 0,8...1,0% та пропорційним зростанням кислотності до 2 см³ розчину NaOH концентрацією 1,0 моль/дм³ на 100 см³ квасу в зразках № № 1, 2, 3 протягом 17...21 год.

Враховуючи фізіологію культур мікроорганізмів, для достатнього кислотоутворення за якомога менший проміжок часу доцільно провести дослідження за температури понад 30°C.

Зміну концентрацій сусла і титрованої кислотності за температури 36°C наведено на рис. 3, 4.

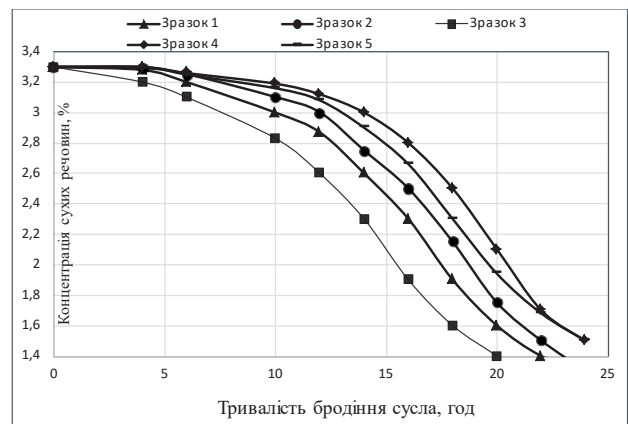


Рис. 3. Динаміка зміни вмісту сухих речовин при температурі 36°C

Встановлено, що за температури бродіння 36°C у всіх зразках сусло досягло необхідних показників за менший проміжок часу, ніж за 30°C. Найбільш інтенсивно процес відбувався в 3-му (14 год.), 1-му (16 год.) та 2-му (18 год.) зразках, що можна пояснити вмістом культур із більшою термотолерантністю.

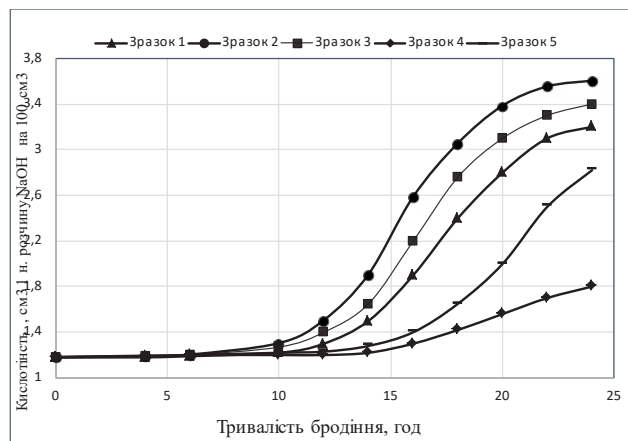


Рис. 4. Динаміка зміни титрованої кислотності при температурі 36°C

Наростання кислотності найбільш інтенсивно відбувалося в 1-му, 2-му та 3-му зразках. Водночас динаміка бродіння зразків № 4 та № 5 суттєво відрізнялася від попередніх.

Отже, порівнянням отриманих результатів встановлено, що досліджена раса дріжджів здатна зброджувати квасне сусло за наявності непритаманних для квасоваріння культур молочнокислих бактерій, як за звичайної для спиртового бродіння температури (30°C), так і за вищої – 36°C. Встановлено також, що в зразках

№ № 1, 2, 3 за вищої температури і за менший проміжок часу тривалість бродіння була на 3...5 год. менша за 30°C.

Висновки. У разі використання дріжджів *Saccharomyces cerevisiae* A 01/06 для приготування хлібного квасу можна рекомендувати сухі закваски молочнокислих бактерій Ацидолакт VIVO та Йогурт VIVO за температури бродіння 30...36°C. У подальших дослідженнях необхідно визначити можливість використання інших культур дріжджів та заквасок молочнокислих бактерій.

Список літератури:

1. Домарецький В.А., Прибильський В.Л. та ін. Інноваційні технології продуктів бродіння і виноробства: підручник / за ред. С.В. Іванова. Київ: НУХТ, 2012. 487 с.
2. Домарецький В.А., Прибильський В.Л., Сичевський М.П., Чередниченко В.П. Напої з екологічно чистої сировини. Харчова і переробна промисловість. 1996. № 9. С. 16–17.
3. Прибильський В.Л., Домарецький В.А., Коваленко Н.К., Підгорський В.С., Григоров Ю.Г. Використання нових штамів мікроорганізмів у виробництві безалкогольних ферментованих напоїв. Харчова і переробна промисловість. 2003. № 1. С. 14–15.
4. Чаварга О.М., Прибильський В.Л., Домарецький В.А. Виробництво нових напоїв оздоровчого напрямку на основі натуральної рослинної сировини. Наукові праці УДУХТ. № 10. К.: УДУХТ, 2001. С. 15.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СУХИХ ПРЕПАРАТОВ МОЛОЧНОКИСЛЫХ БАКТЕРИЙ ПРИ СБРАЖИВАНИИ КВАСНОГО СУСЛА

Изучена физико-химическая и физиологическая характеристики сухих препаратов молочнокислых бактерий VIVO. Исследована динамика изменения концентрации сухих веществ и кислотности при разных условиях сбраживания сусли. Установлено, что дрожжи способны сбраживать квасное сусли при наличии нехарактерных для квасоварения культур молочнокислых бактерий. Доказано, что в образцах Ацидолакта VIVO, Йогурта VIVO и Кваса VIVO при температуре 36°C процесс брожения сокращается на 3...5 часов по сравнению с брожением при температуре 30°C. Поэтому целесообразными являются дальнейшие исследования по использованию этих бактерий в производстве кваса.

Ключевые слова: молочнокислые бактерии, закваска, дрожжи, сусли, брожение, кислотность.

USE OF DRY PREPARATIONS OF LACTIC ACID BACTERIA IN THE FERMENTATION OF KVASS WORT

Physical and chemical and physiological characteristic of dry preparations of lactic acid bacteria VIVO was studied, expediency of their using in beer making is proved. The dynamics of changing of concentration of dry substances and titrated acidity was investigated by different conditions of fermentation of wort. It was installed that the biggest growth of yeast cells is in samples with Acidolact VIVO and yoghurt VIVO at fermentation temperature 36°C during using of investigated preparations of lactic acid bacteria. Dry preparations of lactic acid bacteria Acidolact VIVO and yoghurt VIVO are recommended for making bread kvass. The expediency of their using in the technology of bread kvass is proved. The ability to actively influence the formation of high organoleptic and normative physical and chemical parameters of the finished product is also proved.

Key words: lactic acid bacteria, leaven, yeast, wort, fermentation, acidity.

Чаплун Д.О.

Харківський державний університет харчування та торгівлі

ПЕРСПЕКТИВИ РОЗРОБЛЕННЯ М'ЯСНИХ НАПІВФАБРИКАТІВ НА ОСНОВІ СУБПРОДУКТІВ

У статті досліджуються методи отримання напівфабрикатів на основі субпродуктів, їх актуальність, проблеми та сфера використання. Розглядається актуальність такого субпродукту, як стравохід великої рогатої худоби. Наведений короткий огляд цього продукту, запропонована принципова схема перероблення стравоходу та приготування напівфабрикату.

Ключові слова: субпродукти, актуальність, стравохід, структура, принципова схема, напівфабрикати.

Постановка проблеми.

– Економічний стан країни. У країні спостерігається ситуація, яка впливає на платоспроможність громадян і здатність підприємств задовольняти вимоги ринку. Зменшення кількості поголів'я сільської худоби, збільшення витрат на утримування, погіршення умов торгівлі з деякими країнами призводить до зростання цін на м'ясні продукти та до їх дефіциту.

– Пошук альтернативних джерел. Субпродукти завжди мали високу популярність, вона, як видно, буде зростати й надалі, особливо з огляду на наявність широких мас населення, що мають доходи нижче прожиткового мінімуму. При цьому саме несприятлива цінова й загальна економічна ситуація в країні сформуvala із цих продуктів повноцінну товарну групу. Раніше ці продукти існували у вигляді доповнення до широкого асортименту м'ясних продуктів.

– Низький рівень дослідження. Частина субпродуктів на ринку має низьку популярність. Важливим є пошук унікальних субпродуктів і їх дослідження для подальшого використання в різних цілях і привертання до них уваги.

– Відсутність спеціалізованого обладнання та ліній для перероблення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Для дослідження сфери субпродуктів були проаналізовані такі джерела: книга, у якій розглядається структура підприємства з виробництва м'яса [1]; фізико-хімічні та біохімічні основи технології м'яса й м'ясопродуктів [2]; коротка стаття про субпродукти [3]; книга про субпродукти, у якій наведені короткі відомості про санітарно-гігієнічний контроль, правила техніки безпеки в субпродуктовому цеху, про організацію підпри-

ємства [4]; збірник, у якому наведені рецептури страв із субпродуктів [5]; книга про обладнання, яке використовують на підприємствах переробки м'яса [6]; книга про види, особливості та рецептури напівфабрикату [7]; книга про обладнання для виробництва напівфабрикату [8, с. 203].

Постановка завдання. Метою цієї роботи є огляд сучасного ринку м'яса; дослідження такого субпродукту, як стравохід великої рогатої худоби; створення принципової схеми переробки стравоходу; вибір того, які напівфабрикати можна виготовити зі стравоходу; формування принципової схеми створення напівфабрикату.

Виклад основного матеріалу дослідження. Субпродукти іноді називають другорядними продуктами забою худоби. Насправді харчова цінність багатьох із них не поступається м'ясу. Субпродукти мають різну харчову цінність і смакові якості. Окремі субпродукти мають однаковий хімічний склад із м'ясом, але вміст вітамінів, мікроелементів і гормональних речовин може бути більшим. Субпродукти використовують як основний або додатковий продукт для виготовлення різноманітних м'ясних і кулінарних виробів.

У табл. 1 наведено значення виходу маси субпродукту відносно маси тварини. Так, у яловичих субпродуктів вихід – 24%, у баранячих – 20%, у свинячих – 17%.

Таблиця 1

Субпродукти	Вихід маси субпродуктів відносно маси тварини, %
Яловичі	24
Баранячі	20
Свинячі	17

На першій діаграмі (рис. 1) ми бачимо кількість виробленого м'яса. Кількість субпродуктів хоча й знаходиться на останньому місці, але відображає стабільне виробництво. Цього вистачає для приготування святкової страви чи вишуканого делікатесу.

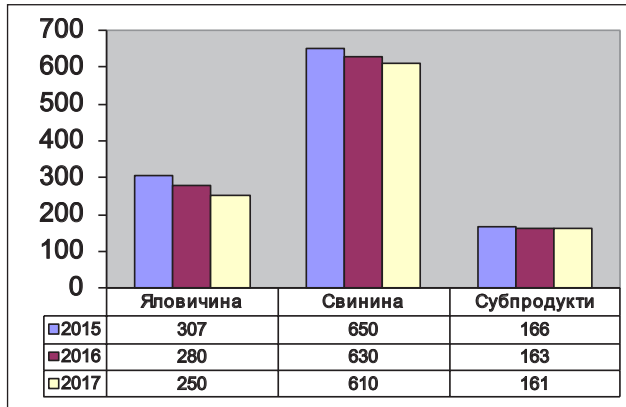


Рис. 1. Виробництво м'яса в Україні, тис. т

Як показано на другій діаграмі (рис. 2), свинину та яловичину країна виробляє сама, тому не має попиту на імпорт, а ось субпродуктів завозять багато (порівняно з яловичиною та свининою). Можна припустити, що субпродукти імпортують, оскільки вони потребують правильного та безпечного оброблення, що потребує коштів, кваліфікованих співробітників і необхідного обладнання.

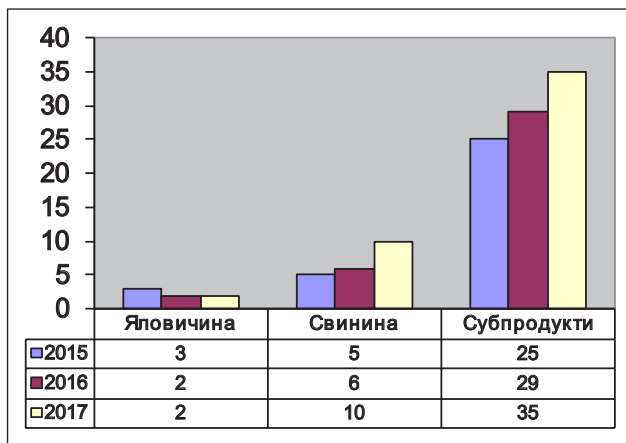


Рис. 2. Імпорт м'яса в Україну, тис. т

Попит на субпродукти поволі зростає, але все ж серед них є продукти, які внаслідок своїх особливостей не використовуються на повну. Це зумовлюється відсутністю технології оброблення, поганими умовами експлуатації, відсутністю коштів на дослідження та проектування.

Для дослідження був обраний стравохід великої рогатої худоби (рис. 3). Стравохід являє собою м'язову трубку.



Рис. 3. Стравохід великої рогатої худоби

Стравохід починається в горлі й закінчується в шлунку, виконує функції транспортування їжі з глотки в шлунок і назад – у ротovu порожнину (для пережовування жуйки). Має такі розміри (рис. 4): довжина – 40 см, діаметр – 6 см, товщина – 0,5 см. На малюнку показаний у розрізаному вигляді й очищений.

Розміри	Значення, см
Довжина	~ 40
Діаметр	~ 5
Товщина	~ 0,5

Рис. 4. Розміри стравоходу

Стравохід (рис. 5) складається з м'язового шару, серозної та слизової оболонки.

Серозна оболонка – тонка щільна сполучнотканинна мембрана, що вистилає внутрішню поверхню, виконує захисну, пластичну, фіксаційну функції. Слизова оболонка служить для захисту, виконання функції травлення і всмоктування. Об'єктом дослідження виступає м'язова оболонка.

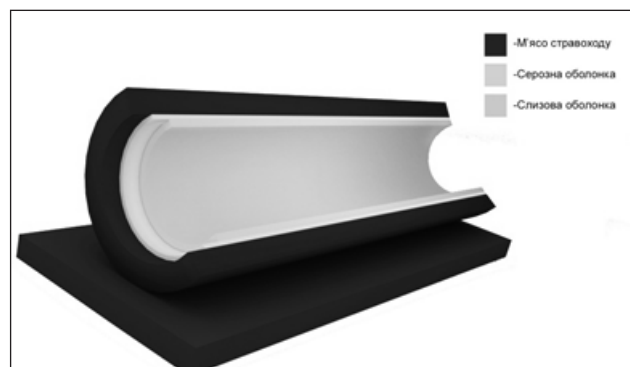


Рис. 5. Структура стравоходу

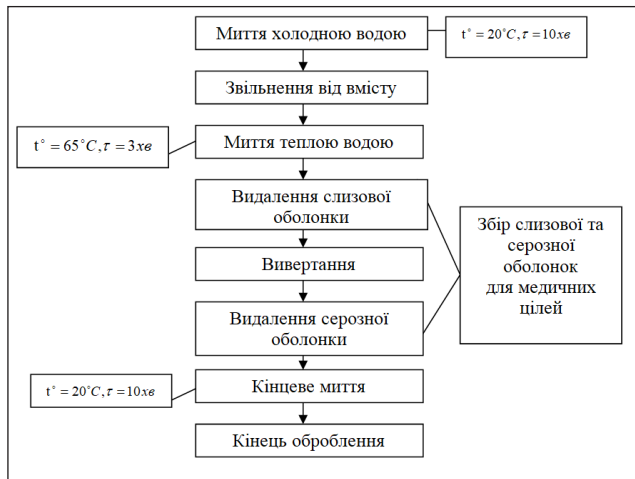


Рис. 6. Принципова схема перероблення стравоходу

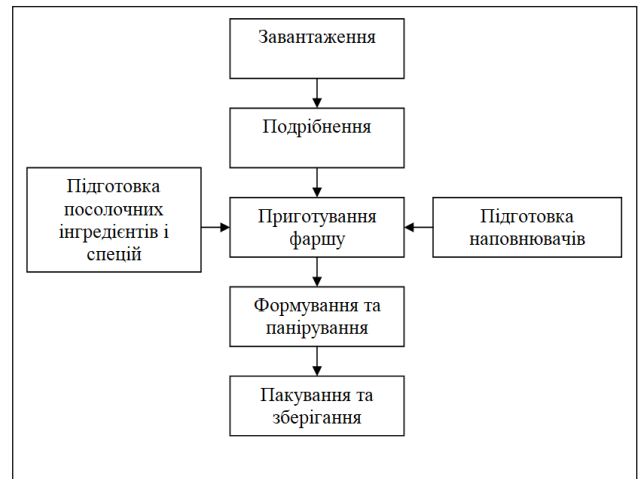


Рис. 7. Принципова схема виробництва фаршу

Вихідною сировиною для дослідження був комплект із трахеї, калтика та стравоходу. Очищений комплект має вагу 700 г. Після очищення стравохід має вагу 200 г, залишки м'яса, які не входять до стравоходу, і жир становлять 100 г.

Для перероблення стравоходу була спроектована принципова схема (рис. 6). Принципова схема перероблення стравоходу має такий вигляд: миття в холодній воді при температурі 20 градусів і тривалістю 10 хвилин для видалення сміття з поверхні продукту та підготовки його до здійснення технологічного процесу; звільнення від вмісту (стравохід усередині містить залишки їжі, що мають щільну консистенцію та не видаляються промиванням); потім – миття теплою водою, у нашому випадку – ошпарювання при температурі 65 градусів тривалістю 3 хвилини з метою послабити зв'язок внутрішніх оболонок. Видалення слизової оболонки можна робити декількома способами: у центрифугах, барабанах, скребкових машинах. Вивертання виконується для того, щоб створити прямий контакт обладнання із серозною оболонкою. Слизова та серозна оболонки можуть бути використані в кормовому цеху або в медичних цілях. Останній етап перероблення – кінцеве миття для надання продукту товарного вигляду.

Зі стравоходу можна виробляти рубані напівфабрикати. Січені (або рубані) напівфабрикати – це вироби, виготовлені з м'ясного фаршу. Крім

м'ясної сировини, під час їхнього виробництва використовують меланж, яєчний порошок, пшеничний хліб, соєві й молочні білкові препарати, цибулю й городину (капусту, картоплю, моркву), а також сухарне борошно та спеції. Із меленого м'яса можна виготовити різні види страв: фрикадельки, м'ясні кнелі, кльоцки, котлети, биточки, люля-кебаб, шніцелі.

Була запропонована схема перероблення стравоходу на фарш (рис. 7). Процес виготовлення напівфабрикатів включає такі операції: завантаження, подрібнення м'яса, подрібнення замоченого хліба, змішування складових частин фаршу відповідно до рецептури, формування, панірування, додаткове формування напівфабрикатів, пакування в ящики та їх пломбування.

Висновки. У статті був проведений огляд стравоходу великої рогатої худоби, запропонована схема перероблення. Із сировини, яку отримали, можна виробити рубані напівфабрикати; була запропонована схема виробництва напівфабрикату. Продукція може поставлятися в супермаркети й магазини роздрібної торгівлі, але метою є розробити продукцію, що буде використовуватись у мережі фаст-фуд. Зараз, коли заклади швидкого харчування мають популярність серед зайнятих людей, можна розробити напівфабрикат у вигляді котлети, який буде використаний у сандвічах і схожій продукції.

Список літератури:

1. Технология мяса и мясных продуктов: учебное пособие. Киев, 2006. 600 с.
2. Горбатов В.М. Физико-химические и биохимические основы технологии мяса и мясопродуктов. Москва, 1973. 250 с.
3. Межгосударственный стандарт. Субпродукты мясные обработанные. Москва, 2015. 3 с. ГОСТ 32244-2013.

4. Рейн Л.М., Грицай Е.В. Субпродукты и их обработка: учебное пособие. Москва, 1970. 50 с.
5. Силаева К.В. Блюда из субпродуктов: учебное пособие. Санкт-Петербург, 2005. 64 с.
6. Голубев И.Г., Горин В.М., Парфентьева А.И. Оборудование для переработки мяса: каталог. Москва, 2005. 217 с.
7. Рощаль В.М. Котлеты и биточки: учебное пособие. Санкт-Петербург, 2008. 64 с.
8. Ялпачик Ф.Ю., Гвоздев О.В., Самойчук К.О. Технологія і механізація виробництва м'яса і м'ясопродуктів: навчальний посібник. Київ, 2007. 272 с.
10. Прогнозы баланса спроса и предложения мяса в Украине в 2017 году. URL: <https://latifundist.com/blog/read/1705-prognozy-balansa-sprosa-i-predlozheniya-myasa-v-ukraine-v-2017-godu> (дата звернення: 15.05.2018).

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗРАБОТКИ МЯСНЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ НА ОСНОВЕ СУБПРОДУКТОВ

В статье исследуются методы получения полуфабрикатов на основе субпродуктов, их актуальность, проблемы и сфера использования. Рассматривается актуальность такого субпродукта, как пищевод крупного рогатого скота. Приведен краткий обзор этого продукта, предложена принципиальная схема переработки пищевода и приготовление полуфабриката.

Ключевые слова: субпродукты, актуальность, пищевод, структура, принципиальная схема, полуфабрикаты.

PROSPECTS OF DEVELOPMENT OF HALF-FINISHED MEAT ON THE BASIS OF THE OFFAL

In article methods of receiving semi-finished products on the basis of an offal, their relevance, problems and the sphere of use are investigated. The relevance of such offal as gullet of cattle is considered. The short review of this product is provided, it is offered the schematic diagram of processing of a gullet and preparation of a semi-finished product.

Key words: offal, relevance, gullet, structure, schematic diagram, semi-finished products.

ТРАНСПОРТ

УДК 658.286:629.4

Красулин А.С.

Приазовский государственный технический университет

Линник Г.А.

Приазовский государственный технический университет

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБСЛУЖИВАНИЯ ТРАНСПОРТНО-ГРУЗОВОГО КОМПЛЕКСА ПРОКАТНОГО ЦЕХА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО КОМБИНАТА

В статье произведен анализ транспортного обслуживания цеха холодного проката. Выявлены факторы, влияющие на рассматриваемый процесс. Установлено, что работа железнодорожного транспорта при обслуживании прокатных цехов металлургического предприятия характеризуется значительной динамикой грузопотоков и вагонопотоков. А процесс обслуживания осуществляется с применением весьма энергозатратных традиционных транспортных технологий, в которых преобладают затраты на перевозку тягловым транспортом повышенной мощности и сцепной массы. Выяснено, что в последний период в Украине вопросам эксплуатации тепловозного парка и энергосбережения при обслуживании транспортно-грузовых комплексов промышленных предприятий не уделяется должное внимание.

Ключевые слова: *промышленный железнодорожный транспорт, тяговые средства, локомотивы, транспортно-грузовой комплекс прокатного производства, транспортные технологии.*

Постановка проблемы. При обслуживании прокатных цехов металлургического предприятия работа транспорта характеризуется значительной динамикой грузопотоков (от 20–30 до 200–250 тыс. т в месяц) и вагонопотоков (от 10 до 120 и более вагонов в сутки). Сам процесс обслуживания осуществляется обычно на основе применения традиционных транспортных технологий с использованием тепловозов мощностью 750–1200 л. с. и сцепной массой от 80 до 120 т, что приводит к высоким транспортным затратам, большую часть которых (до 70%) составляют затраты на дизельное топливо. Причиной таких затрат является крайне неэффективное использование по мощности (16–20%), массе (15–18%) и времени (20–28%), что приводит к крайне низкой производительности (в 12–15 раз ниже средней по металлургическому комбинату). Кроме того, подача и уборка вагонов осуществляется небольшими группами в объеме вместимости грузового фронта (2–15 вагонов) [1]. Эта ситуация на промышленном транспорте воз-

никла из-за наращивания тяговых возможностей локомотивов за счёт увеличения их сцепной массы и мощности, но для конкретных эксплуатационных условий необходим оптимальный типажный ряд тяговых средств, которому в свое время не уделялось внимание. Это привело к тому, что в тепловозном парке предприятий увеличивалась доля локомотивов повышенных сцепной массы и мощности в целом ряде случаев избыточных, а затраты на их эксплуатацию, особенно энергоресурсы, постоянно и существенно увеличиваются.

Одним из направлений уменьшения указанных затрат является внедрение новых транспортных технологий с использованием на обслуживании транспортно-грузового комплекса прокатных цехов металлургического предприятия более экономичных тяговых средств. Решение этой проблемы связано с необходимостью внедрения в транспортный процесс тяговых средств на базе колёсных тракторов или самоходных шасси на комбинированном ходу. При этом существенно

увеличится эффективность транспортного обслуживания в конкретных эксплуатационных условиях, что снизит затраты на энергоносители.

Главное достоинство тяговых средств на комбинированном пневморельсовом ходу состоит в том, что при собственной массе в 10–16 т и мощности силового агрегата в 175–240 л. с. они способны развивать тяговое усилие в 30–60 кН, обеспечивая обслуживание производственных объектов с вагонотокотом 35–50 вагонов в сутки [2].

Анализ последних исследований и публикаций. Необходимость обеспечения конкурентоспособности продукции ставит перед металлургическими предприятиями новую проблему существенного снижения транспортных издержек при эксплуатации тепловозного парка на основе разработки адаптационных решений.

В последнее время в Украине вопросам эксплуатации тепловозного парка и энергосбережения при обслуживании транспортно-грузовых комплексов промышленных предприятий не уделяется должное внимание. Число публикаций на эту важную и актуальную тему весьма ограничено.

В работах [4; 3] автор, не оценивая фактического положения на предприятиях, не конкретизируя эксплуатационные условия и производственные требования, предлагает формировать типаж тепловозов на основе модульного принципа. Он предусматривает базовый модуль с возможностью его комплектования дополнительными модулями, обеспечивающими заданную величину сцепного веса и силы тяги. Очевидно, что предлагаемый принцип, не давая видимых преимуществ, приведет к существенному усложнению эксплуатации парка и снижение затрат на тягу обеспечить не сможет. В публикациях [4; 5; 6] освещаются работы по внедрению системы учёта и регистрации параметров работы тепловозов на металлургических предприятиях. Однако данные о практическом использовании результатов в процессе эксплуатации тепловозов не приводятся. В то же время данные зарубежных источников [6; 7] свидетельствуют о том, что на железнодорожном транспорте предприятий европейских стран одним из направлений снижения транспортных издержек стала замена на целом ряде транспортных технологий тепловозов на более эффективные и экономичные тяговые средства – локотракторы. В настоящее время они изготавливаются несколькими машиностроительными фирмами (“Unimog-Mercedes”, “Zephir” и др.), с весьма широкой гаммой типоразмеров, а предприятия широко их используют в транспортных технологиях.

Таким образом, имеются все основания считать, что решение перспективных вопросов развития тепловозной тяги на промышленном железнодорожном транспорте связано в первую очередь с определением направления повышения эффективности использования локомотивов, обеспечивающего существенное снижение затрат на тягу.

Постановка задания. Целью статьи является повышение эффективности обслуживания транспортно-грузовых комплексов прокатных цехов металлургических предприятий.

Изложение основного материала исследования. Анализ факторов [1, с. 139–139], способствующих появлению значительных простоев вагонов в цехе холодного проката (далее – ЦХП), показал, что в настоящих условиях фактически отсутствует логистическое управление потоковыми процессами. При современной технологии и организации погрузочно-транспортных операций не существует обоснованной увязки сроков подачи вагонов с процессом материалодвижения.

Подвижной состав подаётся на станцию Холодный прокат, обслуживающую ЦХП, заблаговременно, к началу каждой производственной смены, при этом грузовые операции обычно производятся в конце смены. Кроме того, несинхронное движение материального и информационного потоков при отгрузке продукции приводит к дополнительной занятости путей технологической станции, что также отражается на несвоевременной уборке подвижного состава с грузовых фронтов, и, как следствие, на задержке следующей подачи вагонов. Таким образом, различный ритм работы производства и транспорта предопределяет низкие эксплуатационные показатели транспортного обслуживания транспортно-грузового комплекса (далее – ТГК) ЦХП. Разработанный технологический график отгрузки проката в ЦХП (рис. 4) дает значительное сокращение простоя вагонов, в среднем около 3-х часов за смену. В предыдущих работах (8) отмечено, что на основе опыта применения энергоэффективных тяговых средств в зарубежных странах кафедрой «Транспортные технологии предприятий» Приазовского государственного технического университета (далее – ПГТУ) разработана принципиально новая энергосберегающая транспортная технология на основе применения мобильных тяговых средств.

Для реализации данной технологии ПГТУ совместно с ООО «МП «Азовмашпром» и ОАО «Харьковский тракторный завод им. Серго Орджоникидзе» разработан и создан первый в Украине опытный образец маневрового тягача

ТМ1.175 на пневморельсовом ходу на базе колёсного трактора ХТЗ-150К-09, а также разработан алгоритм формирования энергосберегающей транспортной технологии (8).

Маневровый тягач оснащён направляющими рельсовыми тележками, обеспечивающими комбинированный пневморельсовый движитель, а также световой и звуковой сигнализацией в соответствии с Правилами технической эксплуатации (далее – ПТЭ) железнодорожного транспорта промышленных предприятий. Общий вид тягача во время проведения промышленных испытаний представлен на рис. 1, а краткая техническая характеристика – в табл. 1.



Рис. 1. Маневровый тягач ТМ1.175 во время испытаний на путях металлургического предприятия

В предыдущих работах [9; 10] отмечено, что в качестве базового предприятия принимается крупный металлургический комбинат, а анализ эксплуатационных показателей производится на наиболее сложном с точки зрения транспортного обслуживания прокатном производстве – цехе холодного проката.

Причём цикл работы локомотивов в ТГК при отгрузке продукции включает следующие операции:

- расстановку групп пустых вагонов (от 2 до 8 вагонов) по грузовым фронтам цеха;
- уборку гружёных групп вагонов со всех фронтов цеха, выставку их на отправочный путь станции;
- формирование поезда и отправление на заводскую сортировочную станцию комбината.

Фрагмент эксплуатационного графика работы локомотива при отгрузке металлопродукции с отражением продолжительности операций, связанных с обработкой одной заявки цеха, представлен на рисунке 2.

Отгрузке подлежат 23 вагона: из них на внешнюю сеть – 18 вагонов, 5 вагонов технологиче-

ских. График составлен с использованием фактических временных показателей технологических транспортных операций, а также данных по продолжительности грузовых операций в цехе холодного проката.

На основе полученных данных суточное время фактической работы локомотива составило 1 257 часов. Учитывая ежедневное техническое обслуживание ТО-1, а также ТО-2, проводимое 4–5 раз в месяц, полезная работа тягового подвижного состава составляет 89,08% фонда рабочего времени. Данный показатель удовлетворяет эффективности использования локомотивного парка при обслуживании прокатного цеха, результаты расчётов приведены в таблице 2.

Анализ показателей использования локомотивов при обслуживании транспортно-грузового комплекса цеха холодного проката даёт основание считать, что оно на рассматриваемом предприятии в целом ряде случаев является неэффективным по мощности, сцепному весу, экономическим результатам, а также весьма энергозатратным.

Одним из направлений применения энергосберегающей технологии при транспортном обслуживании транспортно-грузового комплекса прокатного производства является применение принципиально нового тягового средства, трансформируемого для использования на железнодорожных и автомобильных перевозках. Таким транспортным средством является маневровый тягач на комбинированном ходу.

Результаты испытаний и проведенные исследования показали, что маневровые тягачи по своим эксплуатационно-техническим показателям наиболее эффективны при транспортном обслуживании грузовых комплексов производственных цехов.

На многих зарубежных предприятиях накоплен немалый опыт применения подобных машин. Наибольший интерес для отечественных условий представляет опыт применения итальянской фирмы “Zephir” (рис. 3) (образец впервые создан в 1978 г.). Основой их конструкции служит специально разработанное шасси. Следует отметить широкий выбор моделей тяговых средств рассматриваемого производителя. Данный факт предоставляет возможность наиболее оптимально увязать эксплуатационные условия работы с техническими характеристиками принимаемого тягового средства.

Главное достоинство маневровых тягачей в том, что при массе 10–12 т и мощности в 200–300 л. с. они способны на рельсовом ходу развивать тяговое усилие, обеспечивающее перемещение

группы вагонов в количестве 6–8 единиц на уклонах до 8%, сохраняя возможность работы в качестве тягача на автоперевозках.

В процессе промышленных испытаний маневровый тягач ТМ1.175 показал хорошие эксплу-

атационные качества и обеспечивал транспортирование группы гружёных вагонов массой до 425 т на различных уклонах (от 0% до 8,5%), совмещённых с кривыми участками рельсового пути ($R = 70 \div 180$ м) на средних скоростях движения

Таблица 1

Техническая характеристика маневрового тягача ТМ1.175

Наименование показателей	Величина
1. Назначение.	Выполнение маневровой работы с железнодорожным подвижным составом и работ с автоприцепами.
2. Способ движения.	Комбинированный: на рельсовом ходу, с применением направляющих роликоопор; на пневмошинном ходу, типовой.
3. Марка и тип базового трактора.	ХТЗ-150К колесный, промышленный.
4. Мощность силовой установки, л. с.	175
5. Скорость движения, км/ч: – передний ход; – задний ход.	3,36–30,08; 5,1–9,1.
6. База, мм: – основных колес; – роликоопор.	2 860; 6 340.
7. Диаметр роликоопор по кругу катания, мм	350
8. Привод подъема и опускания роликоопор.	Гидравлический.
9. Высота подъёма роликов направляющих тележек над уровнем головки рельса, мм: – передних; – задних.	480; 365.
10. Минимальный радиус кривой, проходимый на роликоопорах, м.	75
11. Автосцепное устройство: – тип; – высота автосцепки от головки рельс, мм.	СА-3; 1060.
12. Эксплуатационная масса, т.	11,8
13. Габаритные размеры, мм (длина, ширина, высота).	6 500, 2 406, 3 195.
14. Продолжительность установки тягового средства на ж.-д. путь, мин.	2
15. Дополнительный компрессор.	ВО-0,8/10 У1
16. Тормозной кран, усл. №.	394
17. Дополнительные резервуары тормозной системы, л.	400
18. Время заполнения воздушной системы, мин.	7

Таблица 2

Показатели использования локомотива по мощности, силе тяги и сцепному весу

Наименование операций	Расчётный уклон, %	Средняя скорость при манёврах, км/ч	$P_{сч}$, т	F_k , кгс	N_e , л. с.	$n_{ваг.}$
Уборка гружёных вагонов с погрузочных фронтов цеха на выставочный путь	5,3	5,0	19,6	5 684	105,3	1–10
Транспортировка пустых вагонов с районной станции на станцию, обслуживающую цех			11,1	3 229,9	59	18
Постановка пустых вагонов на грузовые фронты			4,8	1 392,0	25,8	1–10

4,1 ÷ 8,5 км/ч. Конструктивные параметры маневрового тягача соответствуют требованиям «Правил технической эксплуатации железнодорожного транспорта промышленных предприятий» и безопасности движения.

Технология обслуживания транспортно-грузового комплекса цеха холодного проката и фрагмент эксплуатационного графика по отгрузке

металлопродукции при работе локомотора ТМ1.175 представлены на рисунках 4 и 5.

Рациональная сфера применения маневрового тягача при различных объемах перевозок по обслуживанию ТКГ определялась методом экономико-математического моделирования перевозочного процесса. Моделирование производилось для конкретных условий эксплуатации в сопоставлении с

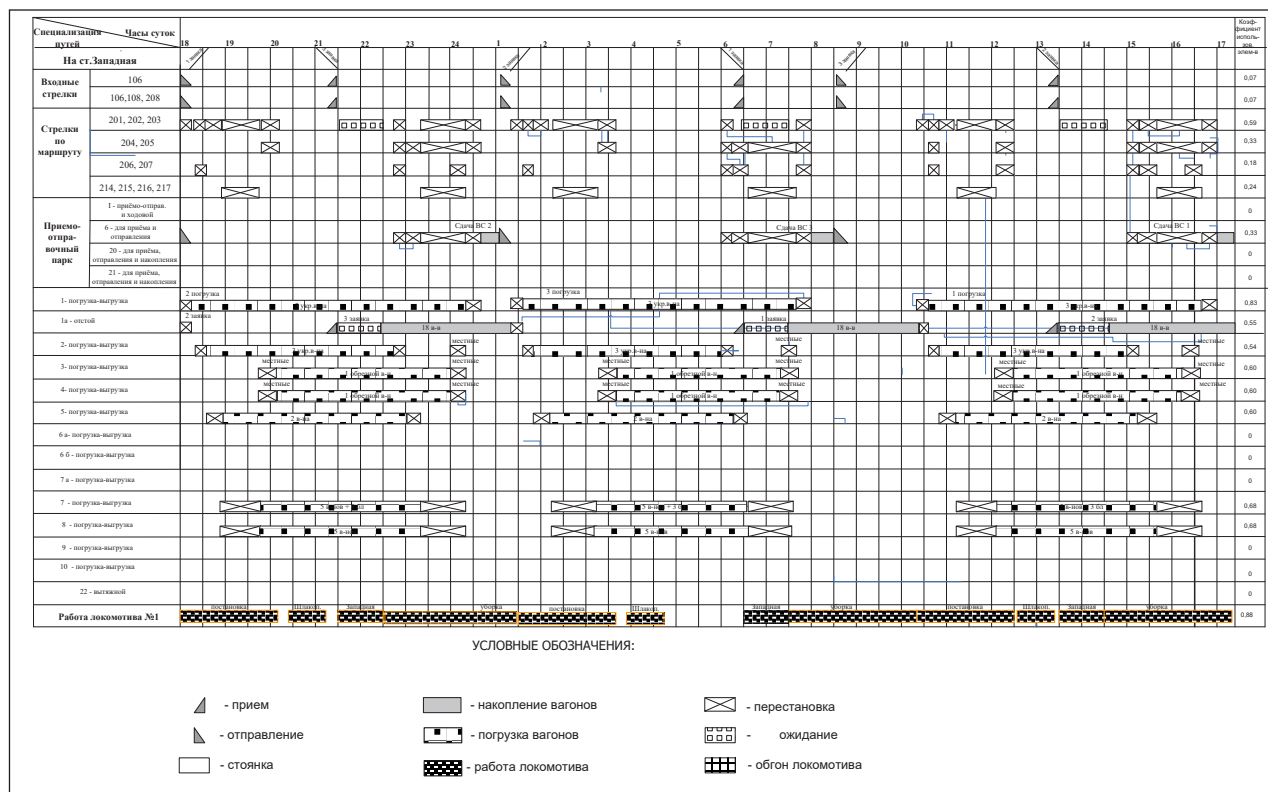


Рис. 2. Эксплуатационный график работы локомотива по обслуживанию цеха холодного проката



Рис. 3. Фото ZEPHIR Loc 22.520



Рис. 4. Технологический график обслуживания ТГК ЦХП с применением локотрактора (постановка под погрузку)

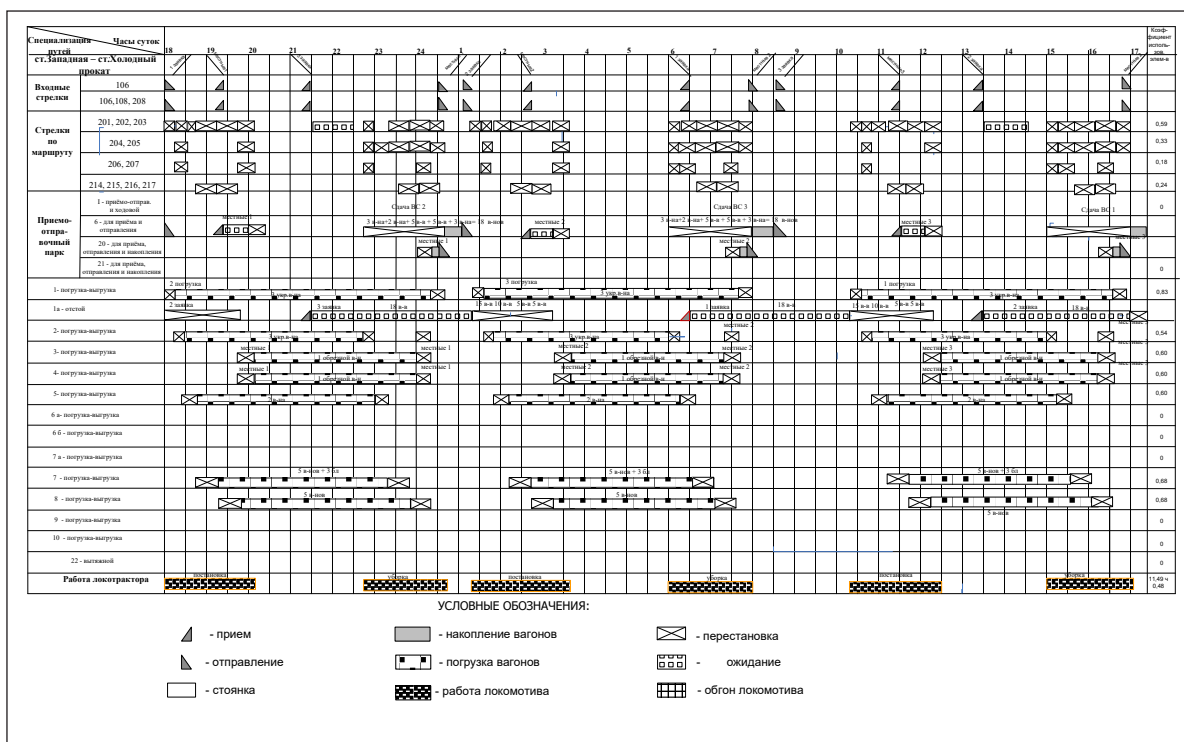


Рис. 5. Эксплуатационный график работы локотрактора по обслуживанию цеха холодного проката

основными сериями маневровых тепловозов, которые используются на ТГК цеха холодного проката. Графическая иллюстрация результатов моделирования представлена на рис. 6.

Как показывают результаты моделирования, при годовом объеме перевозок до 450 тыс. т в год (20 вагонов в сутки) наиболее эффективным

по всему диапазону условий эксплуатации является маневровый тягач на комбинированном ходу. Поэтому задачей повышения эффективности транспортного обслуживания является внедрение прогрессивной транспортной технологии с использованием маневрового тягача на ТГК промышленных предприятий, что позволит получить

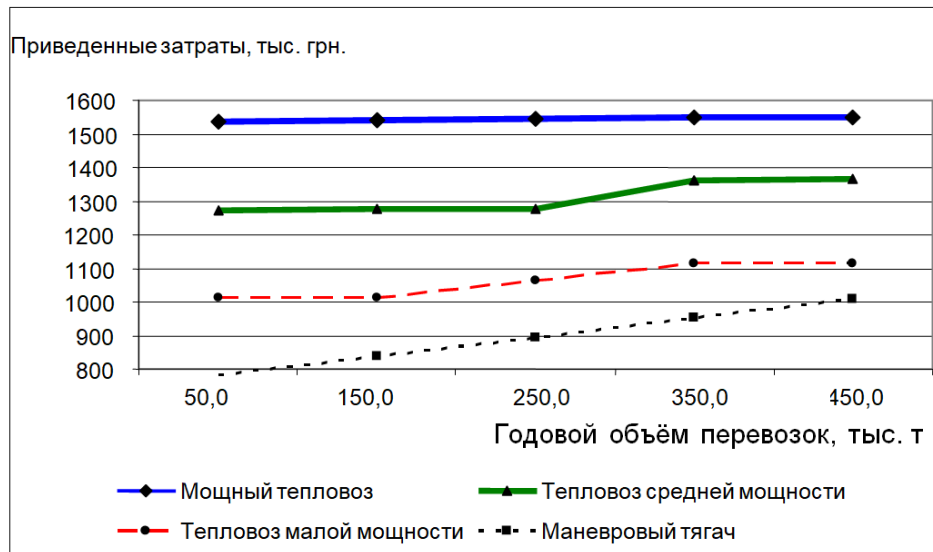


Рис. 6. Зависимость затрат от вида тягового средства и годового объёма перевозок

в современных условиях ощутимый экономический эффект и экономию энергоресурсов.

Выводы:

1. В условиях действия рыночных механизмов транспортное обслуживание грузовых комплексов производственных цехов требует перехода на новые энергосберегающие транспортные технологии.

2. Зарубежный опыт показывает, что для рассматриваемых условий весьма эффективной заменой мощных тепловозов являются тяговые средства на комбинированном пневморельсовом ходу – локотрактора, которые обеспечивают заданный тяговый, скоростной и тормозной режим на всех видах маневровой работы, а также возможность выполнения дополнительного объема транспортной работы в качестве тракторного тягача. Их применение способствует значительному снижению эксплуатационных затрат за счет перехода на более совершенную технологию переработки вагонопотока, а также сокращению энергоресурсов.

3. Для перехода на прогрессивную энергосберегающую транспортную технологию впервые в Украине создан маневровый тягач на базе колёсного трактора ХТЗ-150К-09 на комбинированном ходу. Промышленная проверка маневрового тягача ТМ1.175 подтвердила его работоспособность, надёжность, высокие эксплуатационные качества и соответствие производственным требованиям предприятий. Применение маневрового тягача позволит получить в рассматриваемых условиях значительный экономический эффект. Начаты промышленное производство и поставка маневрового тягача предприятиям.

4. Переход на новые энергосберегающие технологии позволит получить наибольший производственный эффект только при параметрической увязке производственных и транспортных операций в поточный процесс, определении требуемой сцепной массы нового тягового средства и формировании системы логистического управления, обеспечивающей заданные эксплуатационные и технико-экономические показатели.

Список литературы:

1. Парунакян В.Э., Агарков В.Я., Красулин А.С., Примак А.Ф. Применение энергосберегающей транспортной технологии для повышения эффективности обслуживания предприятий. *Металлургическая и горнорудная промышленность: научно-технический и производственный журнал*. 2010. Вып. 4. С. 138–140.
2. Маслак А.В. Методика оценки эксплуатационных показателей работы железнодорожных станций в условиях динамики перевозочного процесса. *Альтернативные источники энергии в транспортно-технологическом комплексе: проблемы и перспективы рационального использования*. 2015. Т. 2. № 2. С. 791–797.
3. Белан А.П. Эффективность работы тепловозов по системе двух модулей. *Промышленный транспорт XXI в.* 2005. № 3. С. 36–38.

4. Басов А.В., Грищенко С.Г. Повышение экономичности силовых установок тепловозов с помощью электронного регулятора СУДМ. *Залізничний транспорт України*. 2005. № 5–6. С. 34–37.
5. Донской А.П. и др. Регистратор параметров работы тепловозов. Энергосберегающие технические средства и технологии. 2005. № 9. С. 3–7.
6. Loctrac “Zweiweg” Unimog fur schiene und strasse: проспект фирмы “Zweiweg” Geratepartnee der Mercedes-Benz A. G.
7. Тягачи, работающие на стыке железных и автомобильных дорог: проспект фирмы “Zephir”. ООО Индустриал Тех-Сервис.
8. Парунакян В.Э., Красулин А.С. К вопросу использования тепловозного парка на промышленном железнодорожном транспорте. *Захист металургійних машин від поломок*. 2014. Вып. № 16. С. 49–58.
9. Маслак А.В., Линник Г.А. Анализ эксплуатационных показателей и пути повышения эффективности транспортного обслуживания прокатных цехов металлургических предприятий. *Вестник ПГТУ*. 2016. № 32. С. 215–221.
10. Красулин А.А., Линник Г.А. К вопросу эффективности обслуживания транспортно-грузового комплекса прокатного цеха металлургического комбината. *Научный взгляд в будущее*. 2017. Вып. 7. Том 1. С. 88–95.

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ОБСЛУГОВУВАННЯ ТРАНСПОРТНО-ГРУЗОВОГО КОМПЛЕКСУ ПРОКАТНОГО ЦЕХУ МЕТАЛУРГІЙНОГО КОМБІНАТУ

У статті проведено аналіз транспортного обслуговування цеху холодного прокату. Встановлені чинники, що впливають на даний процес. Зазначено, що робота залізничного транспорту щодо обслуговування прокатних цехів металургійного підприємства характеризується значною динамікою вантажопотоків і вагонопотоків. А процес обслуговування здійснюється із застосуванням дуже енерговитратних традиційних транспортних технологій, в яких переважають витрати на перевезення тяговим транспортом підвищеної потужності та зчпної маси. Виявлено, що останнім часом в Україні не приділяло я достатньої уваги питанням експлуатації парку тепловозів і енергозбереження під час обслуговування транспортно-вантажних комплексів промислових підприємств.

Ключові слова: промисловий залізничний транспорт, тягові засоби, локомотори, транспортно-вантажний комплекс прокатного виробництва, транспортні технології.

MAINTENANCE EFFICIENCY IMPROVING OF TRANSPORT AND CARGO COMPLEX OF ROLLING SHOP OF THE METALLURGICAL ENTERPRISE

The article analyzes the transport service of the cold-rolling shop. Factors influencing this process are established. It was established that the work of the railway transport in the maintenance of the rolling shops of the metallurgical enterprise is characterized by a significant dynamics of cargo and carloads. The service process is carried out with the use of highly energy-consuming traditional transport technologies, in which the predominant share of transportation costs belongs to traction vehicles of heightened power and coupling mass. It was revealed that in the last period in Ukraine the issues of locomotive fleet exploitation and energy saving in the maintenance of transport and cargo complexes of industrial enterprises do not receive due attention.

Key words: industrial railway transport, traction facilities, locotractors, transport-cargo complex of rolling production, transport technologies.

УДК 629.123

Малахов А.В.

Национальный университет «Одесская морская академия»

Колезаев М.А.

Национальный университет «Одесская морская академия»

Бражник И.Д.

Национальный университет «Одесская морская академия»

МЕТОД ПРИНУДИТЕЛЬНОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ ТРЮМОВ НА ТАНКЕРАХ

В работе дано описание разработанного метода принудительной вентиляции трюмов на танкерах. Сформулированы основные пути модернизации судовых систем инертных газов. Показаны преимущества технологии принудительной вентиляции. На основе результатов исследований показаны основные преимущества разработанного метода. В ходе натурных исследований подтверждена адекватность научных гипотез, математической модели и установлены показатели эффективности разработанного метода.

Ключевые слова: грузовой трюм, танкер, система инертных газов, концентрация кислорода, скорость вентиляции, поле давления.

Постановка проблемы. На всех танкерах в мире используется контур производства и подачи инертных газов (далее – ИГ). Он включается в работу при использовании линий подачи груза в трюм танкера и при работе систем очистки трюмов. Его использование на судне обычно является предварительной стадией при операции получения новых грузов. Использование на танкерах системы ИГ является обязательным, что, начиная с 1978 г., регламентируется решением ИМО [1, с. 118].

При заполнении трюма ИГ вытесняют воздух. Концентрация кислорода в трюме должна снижаться до значений менее 8%. В этом случае микроатмосфера внутри трюма с точки зрения возникновения пожаров или взрывов считается безопасной.

Все судовые контуры производства, обработки и подачи ИГ, входящие в систему ИГ танкеров, являются универсальными и содержат однотипное оборудование и магистрали. При анализе возникающих на них судовых проблем установлено, что чаще всего они связаны с техническими недостатками системы ИГ.

Анализ технологических недостатков в работе систем ИГ на танкерах показал, что основным недостатком является завышенная продолжительность процесса вентиляции. В конечном

итоге, при работе танкера это приносит большие убытки.

Главной причиной длительной вентиляции трюмов танкера ИГ является несовершенство используемых технологий. Вытеснение воздуха из всего рабочего объема трюма происходит только за счет процессов естественной конвекции и диффузии без использования каких-либо принудительных механизмов увеличения скорости процесса массообмена воздуха и ИГ.

Анализ последних исследований и публикаций. Вынужденный подъем воздуха в трюме вызывается действием выталкивающей силы от подаваемых в трюм ИГ. Эта сила появляется из-за изменения плотности вследствие взаимосвязанных между собой процессов теплопереноса и передачи массы из-за различных концентраций ИГ и воздуха. Температурная стратификация потока ИГ в смеси с воздухом по высоте трюма также является одним из факторов, влияющих на скорость вытеснения воздуха из трюма судна [2, с. 42]. Именно она реализует механизм передачи энергии от ИГ к воздуху. В работе [3, с. 118] показано, что при изменении температуры от 20 до 800С плотность воздуха изменяется на 20%, от 1,2 до 0,99 кг/м³.

В работе [2, с. 81] показано, что в случае вынужденной конвекции поле течения в замкну-

том объеме перестает зависеть от механизмов теплопередачи и текущего поля температур.

В применении к вентиляции грузового трюма ИГ наиболее близкими являются результаты работ [4; 5], в которых рассмотрена тепловая конвекция в трехмерном прямоугольном объеме с открытым верхом. Эксперименты проводились в диапазоне чисел Рэлея от 100 до 108. Для случая передачи тепла от одной нагретой стенки к другой были получены безразмерные профили температуры и скорости. В результате установлено, что:

- при числах Рэлея $Ra < 10^3$ в прямоугольном объеме возникает одна ячейка со слабой стационарной циркуляцией. Жидкость, нагретая у стенки, поднимается вверх, а затем опускается вниз около холодной стенки. По ширине всего объема течение направлено только вертикально;

- при числах Рэлея $10^3 < Ra < 10^5$ градиент температуры вблизи стенок возрастает, а во внутренней области течения остается постоянным;

- распределение скорости в диапазоне чисел Рэлея от $3 \cdot 10^4$ до $3,6 \cdot 10^6$ характеризуется симметричностью относительно вертикальной оси симметрии рассматриваемого объема. Рост числа Рэлея свидетельствует о пространственном увеличении по ширине зоны ядра потока с небольшими значениями скорости локализации. Также возникает концевая область течения с высокими значениями скорости потока вблизи жестких вертикальных стенок.

В работах [2; 4; 5] в качестве нижней границы возникновения вторичных течений в замкнутом прямоугольном объеме приводятся различные числа Рэлея. Общий диапазон разброса полученных значений составляет от $Ra = 2,1 \cdot 10^5$ до $Ra = 3,9 \cdot 10^5$. Более сложные структуры потока возникают согласно данным работы [4, с. 107] при числах Рэлея $Ra > 10^6$. В этом случае наблюдается возникновение многоячеистых структур со слабыми сдвиговыми течениями на их границах.

Постановка задания. Исследования механизма использования подачи струй ИГ в грузовой трюм судна проводятся для решения задачи о сокращении времени вентиляции грузового трюма танкера. Цель исследований заключается в разработке новых принципов функционирования системы генерирования и подачи ИГ в грузовые трюмы танкеров, обеспечивающих существенное повышение качества эксплуатации судна за счет изменения технологии вентиляции трюмов и снижения вероятности аварий, связанных с качеством и длительностью работы таких систем.

Изложение основного материала исследований. Метод принудительной подачи ИГ в грузовой

трюм танкера основан на структуре движущихся с малыми скоростями потоков воздуха и ИГ внутри ограничивающих жестких стенок. Существенные изменения эпюр скорости, завихренности и температуры имеют место только в угловых зонах трюма. По этой причине очень важно подавать струи ИГ именно в ядро восходящего воздушного потока. В этом случае турбулизация устойчивого течения в средней части грузового трюма танкера будет приводить только к сокращению времени процесса его вентиляции.

Важным вопросом является количество источников струй ИГ и угол раскрытия – их факела. Меньшие углы раскрытия будут приводить к удлинению струи ИГ и увеличивать зону турбулизации ядра потока воздуха по высоте трюма. Большие углы будут влиять на интенсификацию процесса тепло- и массопереноса в угловых зонах нижней части грузового трюма. По этой причине на стадии экспериментального изучения процесса принудительной вентиляции грузового трюма при помощи ИГ были использованы три технологические схемы, изображенные на рисунке 1.

Первая схема содержала только один источник струи ИГ. Он располагался в центральной точке грузового трюма. В ходе экспериментов использовалось три сопла с углами раскрытия конуса факела вытекающей струи α соответственно равными 160° , 90° и 30° .

Вторая схема содержала четыре источника струй ИГ. Сопла устанавливались по диагонали в центрах четырех одинаковых прямоугольных зон на дне трюма. Использовались сопла с углом раскрытия конуса факела струи 30° . Этот угол применялся для исключения взаимного влияния струй ИГ при их истечении в воздушное пространство.

Третья схема – комбинированная. В ней было пять источников струй ИГ с углом раскрытия факела струи 30° . В начале процесса подачи ИГ использовались краевые сопла, а при снижении исходного значения концентрации кислорода в воздухе на 30% подача ИГ происходила только из центрального сопла.

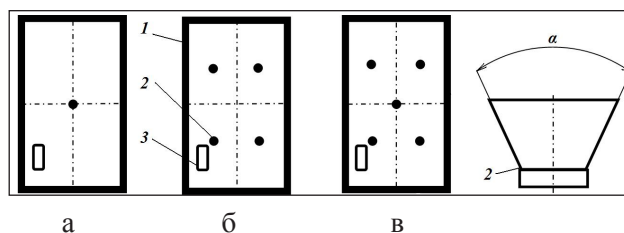


Рис. 1. Схемы подачи струй ИГ в грузовой трюм
а – первая схема; б – вторая схема;
в – третья схема. 1 – грузовой трюм;
2 – сопло подачи ИГ;
3 – выходное люковое отверстие

В соответствии с тремя схемами подачи ИГ в грузовой трюм, были измерены значения величины концентрации кислорода. Измерения проводились одновременно на различных высотах в шести грузовых трюмах. Поскольку при проведении экспериментов главным вопросом являлся выбор наиболее результативной схемы подачи ИГ, то длительность работы газоанализатора была ограничена периодом в 5 часов.

В ходе экспериментов установлено, что самый лучший угол распыла ИГ соответствует величине 30°. Получаемые в этом случае значения концентрации кислорода были наименьшими. Это объясняется большей дальностью действия струи вдуваемых ИГ и соответственным увеличением зоны конвективного взаимодействия ИГ с воздухом.

Качество работы всех трех технологических схем подачи ИГ хорошо видно на рисунке 2. Наилучший результат сокращения времени работы системы был достигнут с использованием третьей технологической схемы. Изменения в лучшую сторону при прочих равных условиях привели к дополнительному уменьшению концентрации кислорода на 3,1%. Как видно из графиков, использование принудительной подачи привело к количественному, но не качественному расхождению в изменениях во времени концентрации кислорода внутри трюма.

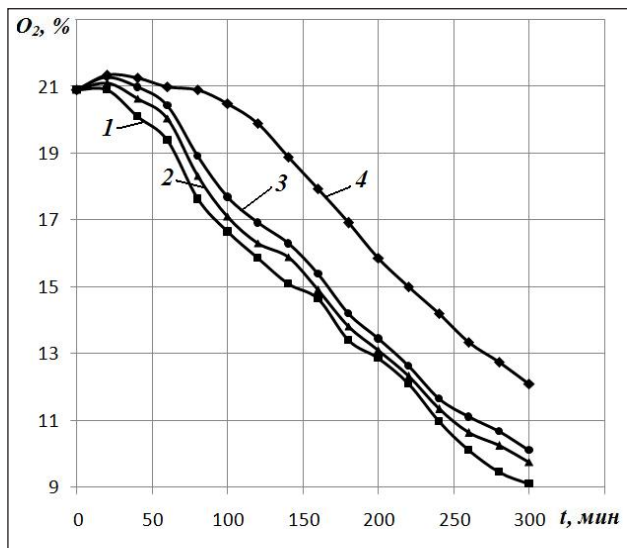


Рис. 2. Скорость изменения концентрации кислорода 1 – схема № 1; 2 – схема № 2; 3 – схема № 3; 4 – стандартная подача ИГ

Полученные результаты показывают, что метод принудительной подачи ИГ внутрь трюма приводит к получению основного результата – сокращению времени вентиляционной обработки трюмов танкера перед получением нового груза.

Экспериментально установлено, что в процентном соотношении улучшение процесса вентиляции трюма при переходе от естественной к принудительной вентиляции трюма составило 13,5%, а сокращение затраченного времени при прочих равных условиях составило 56,47%.

В ходе вытеснения воздуха при помощи ИГ температура внутри грузового трюма танкера постоянно изменяется. Процесс ее изменения во времени по высоте танка был также изучен. В результате, было установлено, что по аналогии с процессом изменения концентрации кислорода внутри пространства трюма также наблюдается стабилизация температуры воздуха и ИГ.

При сравнении результатов измерений температуры на выходе из трюма при стандартной и принудительной вентиляции установлено, что стабилизация в последнем случае также наступает ранее. Температурный градиент, составляющий – 17°С, достигался за время, меньшее на 38,18% по сравнению со стандартной операцией вентиляции грузового трюма танкера.

Все дальнейшие исследования судовой системы принудительной подачи ИГ должны быть направлены на получение данных о характере изменения концентрации кислорода в зависимости от механизмов интенсификации конвективного переноса. Одним из технических решений в этом случае может быть изменение уровня подачи ИГ внутрь грузовых трюмов танкера по высоте в зависимости от степени вытеснения кислорода из рабочего объема трюма.

Выводы:

1. Анализ технологических недостатков в работе систем ИГ на танкерах показал, что основным недостатком является завышенная продолжительность процесса вентиляции, что приносит убытки.

Решением этой проблемы может стать использование процесса принудительного вдува ИГ внутрь трюма с интенсификацией процессов конвективного массопереноса.

2. Наилучшие результаты по снижению концентрации кислорода внутри трюма были получены при использовании величины угла распыла ИГ равной 30°. Это объясняется большей дальностью действия струи вдуваемых ИГ и соответственным увеличением зоны взаимодействия ИГ с воздухом.

3. Переход от естественной к принудительной вентиляции ИГ грузовых трюмов танкера дает сокращение времени технологического цикла на 56,47%. В этом случае температурный градиент между воздухом и ИГ, составляющий – 17°С, достигается также раньше на 38,18%.

Список литературы:

1. Международная конвенция MARPOL 73/78.
2. Джагурия Й. Естественная конвекция. Тепло- и массообмен. М.: Мир, 1983. 400 с.
3. Теплофизические свойства технически важных газов при высоких температурах и давлениях: справочник / В. Зубарев, А. Козлов, В. Кузнецов и др. М.: Энергоатомиздат, 1989. 232 с.
4. Elder J. Turbulent free convection in a vertical slot. Journal of fluid mechanics. March 2006. Volume 23. Issue 1. P. 99–111.
5. Eckert E., Carlson W. Natural convection in an air enclosed between two vertical plates with different temperatures. International Journal of Heat and Mass Transfer. 1961. № 2. P. 106–120.

МЕТОД ПРИМУСОВОЇ ВЕНТИЛЯЦІЇ ТРЮМІВ НА ТАНКЕРАХ

У роботі описаний розроблений метод примусової вентиляції трюмів на танкерах. Сформульовані основні шляхи модернізації суднових систем інертних газів. Показані переваги технології примусової вентиляції. На основі результатів досліджень показані основні переваги розробленого методу. Під час натурних досліджень підтверджена адекватність наукових гіпотез, математичної моделі та встановлені показники ефективності розробленого методу.

Ключові слова: вантажний трюм, танкер, система інертних газів, концентрація кисню, швидкість вентиляції, поле тиску.

METHOD OF ARTIFICIAL VENTILATION FOR TANKER'S HOLDS

In the very article was described a developed method of artificial ventilation for tanker's holds. There were formulated main directions for ship's inert gas system modernization. Advantages of forced ventilation technology were shown. On the basis of investigation results main advantages of the developed method were shown. During experimental investigations has been confirmed an adequacy of scientific hypothesis, mathematical model and had been depicted main effectiveness indexes for the method developed.

Key words: cargo hold, tanker, inert gas system, oxygen concentration, ventilation speed, pressure field.

БУДІВНИЦТВО

УДК 625.731

Арсеньєва Н.О.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

ОСОБЛИВОСТІ РОЗРАХУНКУ АСФАЛЬТОБЕТОННИХ ШАРІВ НА ЗСУВ У ПРОЕКТУВАННІ НЕЖОРСТКИХ ДОРОЖНІХ ОДЯГІВ

У статті розглянуті питання визначення міцності на зсув у розрахунках асфальтобетонних шарів нежорстких дорожніх одягів. Наведені основні особливості визначення зсувостійкості шарів із асфальтобетону у конструюванні та проектуванні дорожнього одягу. Накопичування пластичних деформацій в асфальтобетонному покритті у вигляді колії, напливів та інших деформацій зсуву в теплу пору року приводить до зниження швидкості руху транспортного потоку та зниження споживчих властивостей автомобільної дороги. Сучасні методики розрахунку монолітних шарів нежорстких дорожніх одягів базуються на теоріях міцності, які не враховують реальні умови механізмів руйнування асфальтобетонних покриттів. У сучасних нормативах України відсутній розрахунок на зсувостійкість асфальтобетонних шарів. Саме тому визначення міцності на зсув є необхідним у проектуванні дорожніх одягів, які б відповідали високим споживчим властивостям.

Ключові слова: асфальтобетонні шари, нежорсткий дорожній одяг, міцність на зсув, теорії міцності, критерій міцності.

Постановка проблеми. Зміна інтенсивності і складу руху на автомобільних дорогах України призвели до зростання навантажень на конструкцію дорожнього одягу. Виникнення пластичних деформацій за умов високих позитивних температур приводить до зниження якісних показників покриттів дорожніх одягів. Забезпечення зсувостійкості асфальтобетонних шарів нежорстких дорожніх одягів нині виконується за рахунок експериментально підібраних асфальтобетонних сумішей, які більш якісно працюють під навантаженням. Але у проектуванні дорожніх одягів цілком можливо враховувати особливості роботи конструкції та її шарів під навантаженням, за високих позитивних температур на стадії розрахунків. Таким чином, розрахунок асфальтобетонних шарів нежорстких дорожніх одягів на зсув дозволить на стадії проектування визначити міцний матеріал, якій менш схильний до утворення деформацій зсуву.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні методики розрахунку нежорстких дорожніх одягів базуються на критеріях граничного стану і класичних теоріях міцності. У сучасних

нормативах України розрахунок дорожніх одягів ведуть за трьома критеріями граничного стану [1]. Найявна методика розрахунку монолітних шарів покриття ґрунтується на третьому граничному стані: розрахунки на допустимі розтягуючі напруження – тріщиностійкість, і на перший або другий теорії міцності як для крихкого матеріалу. Але це відповідає тільки матеріалам, які перебувають у крихкому стані, у той час як асфальтобетон за умови високих позитивних температур переходить до в'язко-пружно-пластичного стану, що не враховується. Асфальтобетонні шари проявляють термопластичні властивості, тому спостерігається значна залежність деформативних і міцнісних параметрів від температури і складу асфальтобетону.

Вагомий внесок у вирішення цих питань зробили А.М. Богуславський, М.І. Волков, А.В. Руденський, І.М. Руденська, Н.В. Горелишев, І.П. Гамеляк, І.А. Риб'єв, В.К. Веренько, В.В. Мозговий, В.А. Золотарев, В.К. Жданюк, Е.А. Казарновська, В.С. Тітарь та ін.

Нині в Україні відсутня база критеріїв для розрахунків асфальтобетонних шарів на міцність, яка

б враховувала механізми руйнування, стан і поведінку матеріалу за підвищених температур і дії навантаження.

Постановка завдання. Основною метою статті є визначення особливостей розрахунку асфальтобетонних шарів з урахуванням їх термопластичних властивостей. Відсутність теоретичної основи у розрахунках роботи асфальтобетону за високих температур та емпіричний підхід для забезпечення міцності матеріалу за цих умов доводять, що необхідно переглянути методики розрахунку монолітних шарів нежорстких дорожніх одягів.

Виклад основного матеріалу дослідження. У розрахунках нежорстких дорожніх одягів нині використовують класичні теорії міцності: першу або другу. Але вони враховують крихкий стан матеріалу і не враховують перехід до пластичного стану, тому дають найбільш задовільні результати тільки для крихких типів матеріалів. Використання в розрахунках дорожніх одягів тільки одного стану матеріалу не відображає реальної картини роботи матеріалу, оскільки крихкий стан асфальтобетону дійсний для низьких температур, а для підвищених температур матеріалу характерне в'язко-пружно-пластичний стан. Також змінюється і механізм руйнування матеріалу.

Таким чином, у виборі теорії міцності для розрахунків асфальтобетону як термопластичного матеріалу необхідно враховувати стан матеріалу і механізм руйнування. Для асфальтобетону, який працює у різних станах, пропонується використовувати критерій Писаренка – Лебедева (другий), який базується на енергетичній теорії. Запропонований критерій враховує: різний опір асфальтобетону стиску і розтягу, направленість девіатора напружень і структурну неоднорідність матеріалу [2; 3].

$$\sigma_{e_{II-L}} = \chi \sigma_{e4} + (1 - \chi) \sigma_1 A^{\left(1 - \frac{3\sigma_{сep}}{\sigma_{e4}}\right)}, \quad \chi = \frac{R_{роз}^0}{R_{cm}^0} \quad (1),$$

де $R_{роз}^0$ – міцність на розрив, МПа;

R_{cm}^0 – міцність на стиск, МПа;

σ_{e4} – еквівалентне напруження за четвертою теорією міцності або інтенсивність напружень, МПа;

σ_1 – максимальне головне напруження, МПа;

$\sigma_{сep}$ – середнє напруження, яке характеризує жорсткість напружень, МПа;

A – константа, яка залежить від характеру наявних у матеріалі дефектів і відображає статичне єство руйнування.

$$A = \frac{\sigma_{роз} - \sqrt{3}\chi\tau_k}{(1 - \chi)\tau_k}$$

τ_k – граничне значення напруження у разі кручення.

Для вирішення задачі оцінки міцності асфальтобетонів на зсув, згідно з запропонованим критерієм міцності, необхідно визначити небезпечні напруження та перевірити міцнісні характеристики матеріалу.

Критерій Писаренка – Лебедева (другий) включає дві групи параметрів.

Перша група параметрів характеризує напружено-деформований стан прийнятої конструкції і має розрахунковий характер. Визначаються головні напруження на найбільш небезпечних перетинах конструкції пакету асфальтобетонних шарів; еквівалентне напруження за IV (енергетичною) теорією міцності і середнє арифметичне головних напружень. Для вирішення подібних задач використовується рішення лінійної або нелінійної теорії пружності. У якості математичного апарату найбільш придатним є метод кінцевих елементів. Теоретичною основою є теорія пружності, а в'язкі властивості враховуються конкретними температурами і часом дії навантаження.

Багатошарову конструкцію дорожнього одягу приводимо до розрахункової схеми, де верхні два – три шари є асфальтобетонними шарами покриття, а всі розташовані нижче шари замінюються на еквівалентний напівпростір. Для такого приведення необхідно знати конструкцію дорожнього одягу з конкретними товщинами і модулями шарів. Значний вплив на напружено-деформований стан конструкції мають параметри розрахункового навантаження, тому їх необхідно визначити для фактичних умов руху транспортного потоку. Для аналізу напружено-деформованого стану асфальтобетонних шарів з урахуванням термопластичних властивостей асфальтобетонів необхідна більш детальна інформація. Вона стосується визначення модулів пружності і коефіцієнта Пуассона асфальтобетонних шарів за розрахунково-експлуатаційних температур. Друга група параметрів у прийнятого критерію стосується фізико-механічних характеристик асфальтобетону шарів покриття. Тому необхідно мати показники міцності асфальтобетону за трьома різними методами випробувань: міцність на одновісний стиск і розтяг, міцність на кручення. Третім випробуванням, крім кручення, може бути випробування на чистий зріз. Характеристики міцності асфальтобетону шарів покриття не залишаються постійними на весь період експлуатації, а залежать від розрахункової температури й інтенсивності навантаження, що також необхідно враховувати.

Вихідними даними для розрахунків за критерієм міцності будуть: категорія дороги, конструкція дорожнього одягу, матеріали шарів; район проектування, кліматичні умови району: мінімальна і максимальна температури повітря, номер дорожнього району за умовами роботи асфальтобетону; характеристика транспортного потоку: інтенсивність, склад, умови руху на характерних ділянках дороги.

Далі необхідно визначити розрахунково-експериментальні параметри: температура шарів покриття, вид і характер розрахункового навантаження; розрахункові характеристики пружності і міцності матеріалу шарів. Для визначення розрахункових характеристик конструкції дорожнього одягу потрібні такі дані: температура покриття і температура асфальтобетонних шарів за товщиною; середньодобова кількість проїздів транспортних засобів і-го типу в межах однієї смуги руху і кількість проїздів на смугу розрахункових автомобілів, за рівнем впливу на зсувостійкість асфальтобетону; кількість циклів навантаження за розрахунковий зсувонебезпечний період (T_{zc}^{50}) год; для окремих ділянок дороги, залежно від сполучення елементів плану, поздовжнього профілю і виду руху транспортного потоку, – тип розрахункового навантаження. Температура асфальтобетонного покриття за температури повітря вищої за $+30^{\circ}\text{C}$ визначається за такими залежностями:

– за умови замірів температури повітря у затінку [4; 5]

$$T_n = 1,3T_{нов} + 7^{\circ}\text{C} \quad (2),$$

– за умови замірів температури повітря на відкритих ділянках [4; 5]

$$T_n = 1,2T_{нов} + 3,2^{\circ}\text{C} \quad (3),$$

де T_n – температура покриття, $^{\circ}\text{C}$;

$T_{нов}$ – температура повітря, $^{\circ}\text{C}$.

За товщиною покриття температура визначається за залежністю:

$$T_z = T_n + \Delta t, \quad (4),$$

де T_z – температура шарів покриття на відстані z см від поверхні покриття;

Δt – поправочний коефіцієнт ($^{\circ}\text{C}$), визначається за табл. 1.

Розрахункова інтенсивність руху і-го типу транспортного засобу на добу з урахуванням очікуваної повторності навантаження визначається за залежністю:

$$N_i = K_{нов} \cdot f_{см} \cdot N_g \cdot P_i, \quad (5),$$

де $f_{см}$ – коефіцієнт, що враховує кількість смуг руху та розподіл руху транспорту на них відповідно до [1];

$K_{нов}$ – коефіцієнт повторності навантаження, що враховує частину автомобілів транспортного потоку, які проходять по одному сліду ($K_{нов} = 0,47$);

P_i – частка і-го типу транспортних засобів у складі транспортного потоку;

N_i – кількість проїздів за добу транспортних засобів і-ої марки, авт./добу;

N_g – середньодобова інтенсивність руху в обох напрямках, авт./добу.

Таблиця 1

Поправка Δt температури за товщиною покриття

$z, \text{ см}$	$\Delta t, ^{\circ}\text{C}$
0	0
1	-0,7
2	-1,37
3	-1,96
4	-2,57
5	-3,02
6	-3,47
7	-3,65
8	-3,83
9	-4,23
10	-4,63
11	-4,95
12	-5,27
13	-5,43
14	-5,59
15	-5,7
20	-5,75
30	-5,8

Середньодобова кількість проїздів транспортних засобів і-го типу в межах однієї смуги проїзної частини визначається згідно з [1] із урахуванням кількості смуг руху.

Для визначення кількості повторних навантажень за зсувонебезпечний період реальний склад транспортного потоку зводять до розрахункового автомобіля за рівнем впливу на зсувостійкість відповідно до [6] та табл. 2.

Кількість повторних навантажень визначають за залежністю:

$$n = T_{zc}^{50} \cdot N_{сеп}, \quad (6),$$

де n – кількість повторних навантажень, одиниць;

T_{zc}^{50} – зсувонебезпечний період (годин);

$N_{сеп}$ – середньогодинна інтенсивність руху розрахункових автомобілів на смугу руху, авт./год.

Таблиця 2

Коефіцієнти приведення транспортних засобів до розрахункового автомобіля за рівнем впливу на зсувостійкість

Навантаження на вісь, кН	Коефіцієнт приведення	
	A1	A2
10	0,09	0,13
20	0,15	0,31
40	0,39	0,5
60	0,56	0,61
80	0,61	0,73
100	0,71	1
115	1	1,5
120	1,2	2
130 і більше	2	2

Примітка: У зв'язку з тим, що у зсувонебезпечний період на місцевих дорогах із полегшеним типом покриття не обмежується рух важких автомобілів, транспортний потік зводять до розрахункового автомобіля А2.

Тривалість зсувонебезпечного періоду залежить від номера району за умовами роботи асфальтобетону [1] і визначається за табл. 3.

Середньогодинна інтенсивність руху розрахункових (за зсувостійкістю асфальтобетону) автомобілів визначається за формулою:

$$N_{\text{сер}} = \left(\sum_{i=1}^n N_i \cdot K_{pi} \right) \cdot a_{\text{год}}, \quad (7)$$

де N_i – середньодобова інтенсивність руху i -го типу транспортного засобу, авт./добу;

K_{pi} – коефіцієнт зведення до розрахункового автомобіля (табл. 2);

$a_{\text{год}}$ – коефіцієнт переходу від добової до годинної інтенсивності руху ($a_{\text{год}} = 0,08-0,12$ або за результатами натурних спостережень руху транспортних засобів).

Згідно з [1; 7], для розрахунків дорожніх одягів приймають динамічне або статичне вертикальне навантаження від умовних розрахункових автомобілів – нормативне навантаження за групами А1, А2, залежно від категорії дороги та типу покриття.

Щодо визначення розрахункової схеми дорожнього одягу та розрахункових фізико-механічних характеристик асфальтобетонів, то фізико-механічні характеристики асфальтобетонів шарів покриття дорожнього одягу визначаються відповідно до умов навантаження і температури. Умови навантаження (динамічні або статичні) визначають час дії навантаження. Залежно від часу дії навантаження і середньої температури шару, визначають динамічні або статичні модулі пружності, коефіцієнт Пуассона, міцність на розтяг, стиск і кручення. Модуль пружності і коефіцієнт Пуассона (E і μ), необхідні для визначення головних напружень у шарах покриття, можна отримати з моделей дорожнього одягу або за розрахунковими таблицями.

Міцнісні характеристики асфальтобетонів – міцність на одновісний стиск (R_{cm}) і розтяг (R_{pos}) – визначають згідно з [8] та експериментальними дослідженнями.

Граничні характеристики міцності асфальтобетонів $|\sigma_+|$ і $|\sigma_-|$ приймаються залежно від типу розрахункового навантаження:

– за статичного, довготривалого навантаження вертикальною силою Q граничною міцністю є показник довготривалої міцності на стиск чи розтяг ($\sigma_{\text{дов}}^-; \sigma_{\text{дов}}^+$). Довготривала міцність визначається в процесі випробування на розтяг і стиск як границя текучості за $\sigma = f(\varepsilon)$. Залежно від міцності на простий розтяг і стиск, довготривалу міцність визначають за:

Таблиця 3

Розрахункові зсувонебезпечні періоди роботи покриття

Номер району	Адміністративні області та їх частини	Розрахунковий зсувонебезпечний період T_{zc}^{50} , години
A1	Волинська, Рівненська, Житомирська (північна)	600
A2	Львівська, Закарпатська, Івано-Франківська, Чернівецька, Хмельницька, Житомирська (південна), Вінницька (північна), Київська (північно-західна), Тернопільська	700
A3	Київська (північно-східна), Чернігівська, Сумська, Черкаська (східна), Полтавська, Харківська (північна)	1 100
A4	Вінницька (південна), Черкаська (західна), Київська (південна), Кіровоградська (північна), Дніпропетровська (північно-західна), Одеська (північна)	2 100
A5	Миколаївська, Одеська (південна), Кіровоградська (південна), Дніпропетровська (південно-західна)	2 250
A6	Дніпропетровська (східна), Донецька, Луганська, Харківська (південна)	2 300
A7	АРК, Херсонська, Запорізька	2 800

$$\left. \begin{aligned} |\sigma_{дог}^+| &= (0, 2...0, 22) R_{роз} \\ |\sigma_{дог}^-| &= (0, 2...0, 22) R_{ст} \end{aligned} \right\} \quad (8);$$

$$\sigma_{дог}^t = \sigma_{дог} (1 - 0,1081 \lg n) \quad (10),$$

– за дії короткочасного навантаження гранична міцність асфальтобетону в розрахунках за критерієм міцності може бути прийнята:

$$\left. \begin{aligned} |\sigma_{кор}^+| &= (0, 45...0, 5) R_{роз} \\ |\sigma_{кор}^-| &= (0, 45...0, 5) R_{ст} \end{aligned} \right\} \quad (9).$$

У часі граничні допустимі напруження як на стиск, так і на розтяг зі збільшенням циклів навантаження (n) зменшуються. Для визначення межі витривалості використовуються криві в томи Веллера [9].

Апроксимуюча залежність для кривих Веллера у напівлогарифмічній системі координат визначається згідно з залежністю:

де $\sigma_{дог}^t$ – допустимі напруження на стиск або розтяг на момент часу t , коли буде n циклів навантаження.

Розрахунок на міцність асфальтобетонних шарів на зсувостійкість виконується за критерієм Писаренка – Лебедева (другий) за залежністю:

$$\chi \sigma_m + (1 - \chi) \sigma_1 \cdot A^{\left(1 - \frac{3\sigma_{ср}}{\sigma_m}\right)} \leq |\sigma_+|,$$

$|\sigma_+|$ – граничні напруження на розтяг, МПа.

Якщо умова міцності ($\sigma_{e_{n-l}} \leq |\sigma_+|$) не виконується, необхідно переглянути конструкцію дорожнього одягу.

Висновки. На основі аналізу критерію міцності та проведених досліджень запропоновані основні положення розрахунку асфальтобетонних шарів нежорстких дорожніх одягів за критерієм міцності на зсув. Визначення критерію міцності дає можливість надати рекомендації з конструювання та проектування більш зсувостійких шарів дорожнього одягу.

Список літератури:

1. Споруди транспорту. Дорожній одяг нежорсткого типу: ВБН В.2.3-218-186-2004. К.: Укравтодор, 2004. 176 с.
2. Писаренко Г.С. Сопротивление материалов. К.: Вища школа, 1979. 696 с.
3. Писаренко Г.С., Лебедев А.А. Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии. К.: Наукова думка, 1976. 415 с.
4. Ковалев Я.Н. К вопросу о продолжительности стояния летней расчетной температуры асфальтобетонных дорожных покрытий в различных климатических районах страны. Известия высших учебных заведений. Строительство и архитектура. 1968. Вып. 7. С. 24–31
5. Ладыгин Б.И., Яцевич А.К. Прочность и долговечность асфальтобетона. Минск: Наука и техника, 1970. 288 с.
6. Методика розрахунку асфальтобетонних шарів покриття на зсувостійкість: 218-02071168-681:2011.К.: Укравтодор, 2009. 61 с.
7. Автомобільні дороги. Споруди транспорту: ДБН В.2.3-4-2015, частина І. Проектування. Частина ІІ. Будівництво. К.: Мінрегіонбуд України, 2007. 100 с.
8. Суміші асфальтобетонні і асфальтобетон дорожній та аеродромний. Методи випробувань: ДСТУ Б В.2.7-319:2016 К.: Мінрегіонбуд України, 2016. 75 с.
9. Пестриков В.М., Морозов Е.М. Механика разрушения твердых тел: курс лекций. СПб.: Профессия, 2002. 320 с.

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СЛОЕВ НА СДВИГ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ НЕЖЕСТКИХ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД

В статье рассмотрены вопросы определения прочности на сдвиг при расчетах асфальтобетонных слоев нежестких дорожных одежд. Приведены основные особенности определения сдвигоустойчивости слоев из асфальтобетона при конструировании и проектировании дорожной одежды. Накопление пластических деформаций в асфальтобетонном покрытии в виде колеи, наплывов и других деформаций сдвига в теплое время года приводит к снижению скорости движения транспортного потока и снижению потребительских свойств автомобильной дороги. Современные методики расчета монолитных слоев нежестких дорожных одежд базируются на теориях прочности и не учитывают реальные условия механизма разрушения асфальтобетонных покрытий. В современных нормативах Украины отсутствует расчет сдвигоустойчивости асфальтобетонных слоев. Именно поэтому определение прочности на сдвиг необходимо при проектировании дорожных одежд, отвечающих высоким потребительским свойствам.

Ключевые слова: асфальтобетонные слои, нежесткая дорожная одежда, прочность на сдвиг, теории прочности, критерий прочности.

FEATURES OF CALCULATION OF ASPHALT CONCRETE LAYERS ON SHEAR AT A FLEXIBLE PAVEMENTS DESIGN

In article questions of definition of shear strength when calculating asphalt concrete layers of flexible pavements are considered. The main features definitions of a shearing strength of layers from asphalt concrete are given during the designing and design of pavements. Accumulation of plastic deformations in asphalt pavement in the form of a track, flows and other deformations of shear in warm season leads to reduction in the rate of the movement of traffic flow and decrease in consumer properties of the highway. Modern method of calculation of monolithic layers of flexible pavements are based on theories of strength, and don't consider real conditions of the mechanism of destruction of asphalt pavements. And in modern standards of Ukraine there is no calculation of a shearing strength of asphalt concrete layers. For this reason, definition of shear strength is necessary at design of the road pavements answering to high consumer properties.

Key words: asphalt concrete layers, flexible pavements, shearing strength, theory of strength, strength criteria.

Туровська Г.І.

Національний університет водного господарства та природокористування

Богданенко О.В.

Національний університет водного господарства та природокористування

АНАЛІЗ БЕЗПЕКИ ТА НАДІЙНОСТІ ЕЛЕМЕНТІВ ТЕХНІЧНОЇ СИСТЕМИ

Вивчення елементів технічної системи з позиції надійності дозволяє провести аналіз їхньої роботи та сформулювати висновки щодо ефективності системи. Запропоновано технічні й організаційні пропозиції щодо підвищення надійності елементів технічної системи на стадії їх проектування, створення і використання. Це важливо для організації технологічних процесів за швидкої зміни режимів експлуатації, вимог виробництва до надійності виробничих об'єктів. А саме зменшення надійності елементів системи неодмінно призводить до збільшення ймовірності виникнення аварійних ситуацій. Величину ризику аварій оцінено з використанням теорії надійності технічних систем та виявлення послідовності небезпечних ситуацій.

Ключові слова: ризик, небезпечна ситуація, аварія, надійність, електроінструмент, технічна система.

Постановка проблеми. Актуальним є питання визначення причин, які призводять до переходу потенційних відмовних чинників порушення надійності в можливі аварійні стани. Це досить важливо в контексті кінцевої мети розрахунку надійності технічних систем і техногенного ризику – оптимізації їх конструктивних рішень, параметрів і режимів експлуатації.

Характерною особливістю сучасних промислових виробів є швидка зміна їхньої міцності, розвиток і поширення втомних режимів, зносів. Тому в розрахунках надійності необхідно враховувати закономірності та фізичні межі таких виробів, розвиток і прояв різних видів відмов через вплив багатьох чинників і характеристик самих виробів і обладнання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблемі надійності технічних систем присвячено багато публікацій як вітчизняних (Б. Гнеденко, Ю. Беляєв, Є. Сугак, А. Соловійов, Н. Бруєвич, І. Ушаков, В. Шишмарьов, П. Вавулін, А. Корчагін), так і закордонних (Р. Барлоу, Ф. Прошан, Д. Кокс, В. Сміт) вчених. Незважаючи на достатньо розкритий зміст основних задач теорії надійності технічних систем, багато аспектів даного питання все ж потребують подальшого дослідження та практичного застосування.

Постановка завдання. Сьогодні приділяється недостатньо уваги дослідженням небезпечних чинників з погляду техногенного ризику щодо праців-

ників під час технологічних процесів із використанням ручного електроінструмента (електродрилі, фрезери, пили, гайковерти, будівельні міксери тощо). На жаль, з року в рік маємо відповідну кількість нещасних випадків, зокрема, зі смертельними наслідками, під час роботи з електроінструментом.

Мета нашого дослідження полягає у вивченні елементів технічної системи з позицій надійності в процесі експлуатації, проведенні аналізу їх роботи та розробленні рекомендацій щодо підвищення надійності елементів на стадії їх проектування, створення і використання.

Для досягнення мети першочергове значення має чітке визначення й реалізація таких завдань: виконати розрахунок показників надійності – середнього напрацювання на відмову елементів електрифікованого інструмента за інтенсивностями відмов, ймовірності безвідмовної роботи, ймовірності відмови елементів у період нормальної експлуатації; отримати сценарії виникнення аварій («дерева відмов») для небезпечної ситуації (ураження струмом під час роботи працівника з електроінструментом).

Завдання зумовили вибір таких методів дослідження: метод системного аналізу безпеки – «дерева відмов», метод структурних схем надійності. Ймовірність безвідмовної роботи електроінструмента визначалася методом перебору.

Виклад основного матеріалу дослідження. Актуальність в управлінні й оптимальність в органі-

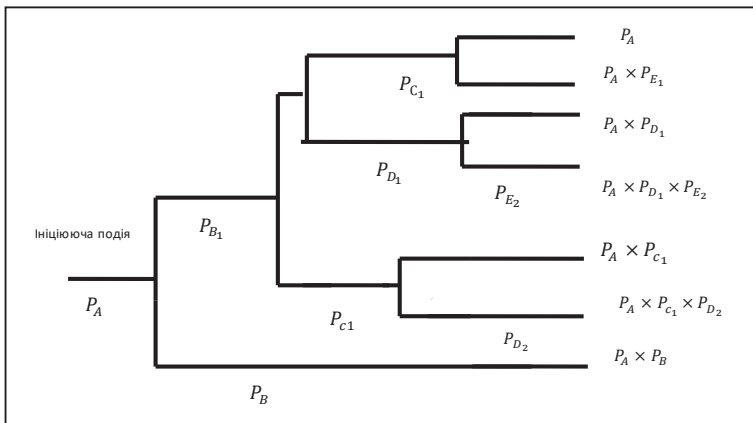


Рис. 1. «Дерево подій» ураження електричним струмом при використанні ручного електроінструмента

зації технологічних процесів, недопущення ризику аварій під час експлуатації обладнання в умовах виробничих підприємств неможливі без прогнозування вірогідного стану, наприклад, безвідмовної роботи виробничого устаткування, промислових виробів, механізмів, інструментів і статистичної оцінки надійності технічних систем. Необхідність таких розрахунків зумовлена швидкою зміною режимів експлуатації, вимогами виробництва до надійності виробничих об'єктів.

Враховавши нормативні пункти правил безпеки роботи з електроінструментом [1; 5; 6] та основні причини, які призводять до переходу потенційних чинників травмування (небезпечна ситуація) у травмуючі реальні, і, як наслідок, – до нещасних випадків, проведемо оцінку ризику виникнення небезпечних ситуацій, пов'язаних із використанням ручного електроінструмента.

Відповідно до [9], визначення ризику виконується поетапно:

I етап – визначення системи і попередній аналіз небезпек.

Крок 1. Визначення потенційних джерел небезпеки – системи, частини системи або елементів, які можуть становити небезпеку.

Крок 2. Виявлення небезпек.

Крок 3. Введення обмеження на аналіз: зі списку небезпек усуваються ті, прояв яких неможливий.

II етап – досліджується вплив відхилень технологічних параметрів обладнання від інструкцій при роботі з електроінструментом з погляду можливості небезпеки.

III етап – виявлення послідовності небезпечних ситуацій, дерева подій, дерева відмов.

Враховуючи рекомендації, принципову схему виникнення і розвитку аварії відповідно до Методики визначення ризиків [4], побудуємо «дерево подій»

(рис. 1), хоча й відомо, хоча й відомо, що ініціююча подія «дерева подій» є верхньою (верхньою подією) «дерева відмов». Але ми розглядаємо небезпечну ситуацію, тому формалізуємо підхід до оцінки безпеки при роботі з електроінструментом для вирішення поставленої задачі (аварія розглядається як нещасний випадок (ураження електричним струмом)).

Подія А – відмова системи захисного заземлення (відсутність зв'язку захисного нульового провідника із заземлювальним пристроєм).

Подія В – порушення ізоляції електропроводки (шнура електроінструмента).

Подія С – живлення електроінструмента (відсутність або підвищення сили струму (замикання провідників) – у вимикачі; коли є контакт (відмова або успіх) – замикання «неможливість відпустити», немає контакту (відмова кнопки) – струм не проходить і людина не підпадає під його небезпечну дію. Підсумком є визначення ймовірності безвідмовної роботи електроінструмента за таблицею істинності (повного перебору) комбінацій «відмова – успіх». Для визначення події С розглядалися моделі структурних схем надійності конструкційних виробів із послідовним і паралельним з'єднанням елементів технічної системи: модель відмови типу «короткого замикання» та відмови типу «обрив» [8].

Подія D – поява струму витоку – поява небезпечного потенціалу на корпусі електроінструмента (металевих частинах) у разі неможливості розриву з'єднання.

Подія E – ураження електричним струмом (підвищення сили струму до небезпечного для людини в разі включення людини в електричний ланцюг).

Визначаємо ймовірність події А в «дереві подій» (рис. 1).

За об'єкт вибрано функціонування електроустановки в електричній мережі із заземленою нейтраллю та зануленням.

Визначимо потенційні небезпеки:

- струмопровідні частини електроінструмента повинні мати захист із заземленням. Є випадки нехтування цим, також заземлення може не відповідати нормам, вимогам ПУЕ [5];

- технічний стан контролюється не щодня;

- невикористання установок заземлення під час їхнього включення в електромережу або накладання під час використання електроінструмента, що суворо заборонено;

- струмопровідні частини інструмента ненадійно ізольовані;

- випадковий дотик до деталей;

– опір ізоляції провідників інструмента менше 1 МОм;

– невикористання захисних засобів захисту в працівника за їх наявності на підприємстві.

Для складання структурної схеми надійності об'єкта з послідовно-паралельним з'єднанням елементів на рис. 2 представлено еквівалентну електричну схему (ланцюг) заміщення електричної мережі.

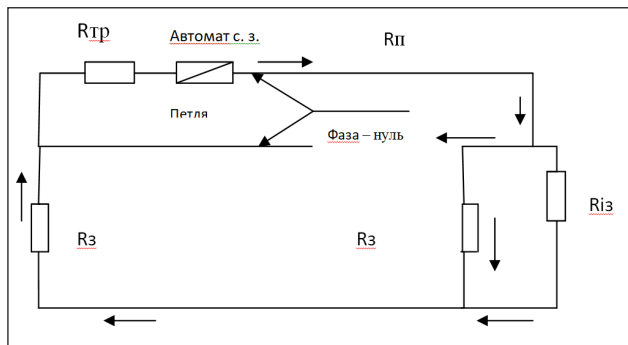


Рис. 2. Еквівалентна електрична схема (ланцюг) заміщення електричної мережі: $R_{тр}$ – опір трансформатора (0,5 Ом); $R_{лп}$ – опір проводів (0); $R_{із}$ – опір ізоляції електропроводів (відповідно ПУЕ не менше 1 МОм); $R_{з}$ – опір заземлювального пристрою (4 Ом); автомат с. з. – автомати струмового захисту

За даними елементами технічної системи складена структурна схема надійності (рис. 3).

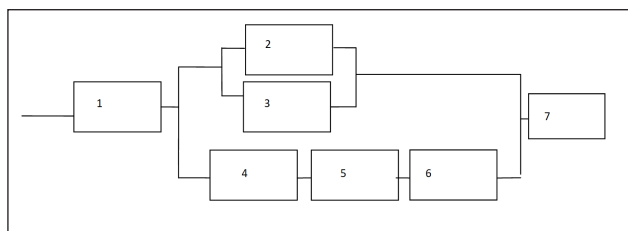


Рис. 3 Структурна схема надійності системи з послідовно-паралельним з'єднанням елементів

Спочатку обрані значення інтенсивностей відмов кожного елемента відповідно [2]. Далі за середнім наробітком на відмову і допущенням про період нормальної експлуатації ймовірність безвідмовної роботи визначаємо за формулою [8]:

$$P(t) = e^{-\lambda t}, \quad (1)$$

де λ – інтенсивність відмов; t – період напруження на відмову електроінструмента (приймаємо за рік $t = 8\,640$ год).

Елемент 1 – відмова заземлення трансформатора за інтенсивності відмов:

$$\lambda_1 = 0,0000015 = 15 \cdot 10^{-7} \text{ 1/год};$$

$$Q_1(8640) = P_1(8640) = 1 - e^{-15 \cdot 10^{-7} \cdot 8640} = 0,0128$$

аналогічно розраховуємо й для інших елементів технічної системи.

Елемент 2 – відмова заземлення електроінструмента:

$$\lambda_2 = 0,0001 = 1 \cdot 10^{-4} \text{ 1/год};$$

$$Q_2(8640) = 0,57$$

Елемент 3 – пробій ізоляції електропроводників електроінструмента:

$$\lambda_3 = 0,0002 = 2 \cdot 10^{-4} \text{ 1/год};$$

$$Q_3 = 0,82$$

Елемент 4 – відмова трансформатора (за статистикою планів спостережень за відмовами, проектною документації) – облік виникнення короткозамкнених витків у разі замикання обмоток:

$$\lambda_4 = 0,000001 = 1 \cdot 10^{-6} \text{ 1/год};$$

$$Q_4 = 0,0086$$

Елемент 5 – відмова автомата струмового захисту:

$$\lambda_5 = 0,000003 = 3 \cdot 10^{-6} \text{ 1/год};$$

$$Q_5 = 0,025$$

Елемент 6 – пробій кабельної лінії:

$$\lambda_6 = 0,0000002 = 2 \cdot 10^{-7} \text{ 1/год};$$

$$Q_6 = 0,0017$$

Елемент 7 – відмова зануленого провідника (обрив):

$$\lambda_7 = 0,000001 = 1 \cdot 10^{-6} \text{ 1/год};$$

$$Q_7 = 0,0086$$

Найслабшими елементами об'єкта, що досліджується, щодо надійності є такі: 2 – заземлення електроінструмента, 3 – ізоляція електропроводки електроустановки.

Формули для розрахунку показника надійності об'єкта:

$$Q_{06} = Q_1 \cdot Q_{2-3} \cdot Q_7. \quad (2)$$

Ймовірність відмови ділянок:

$$Q_{2-3} = 1 - (1 - Q_2)(1 - Q_3) = 1 - (1 - 0,57)(1 - 0,82) = 0,92;$$

$$Q_{4-6} = Q_4 \cdot Q_5 \cdot Q_6 = 0,0086 \cdot 0,025 \cdot 0,0017 = 3,65 \cdot 10^{-7}$$

$$Q_{2-6} = 1 - (1 - Q_{2-3})(1 - Q_{4-6}) = 1 - (1 - 0,92)(1 - 3,65 \cdot 10^{-7}) = 0,82;$$

$$Q = 0,0128 \cdot 0,82 \cdot 0,0086 = 9 \cdot 10^{-5}$$

Отже, надійність даної технічної системи становить 0,999991.

Розглянемо ймовірність ділянки 2–3 в разі підвищення надійності елемента, наприклад на 50%:

$$Q_{2-3} = 1 - (1 - P_2)(1 - P_3) = 1 - (1 - 0,285)(1 - 0,44) = 0,6;$$

$$Q = 0,0128 \cdot 0,6 \cdot 0,0086 = 6,6 \cdot 10^{-5}. P = 0,999934.$$

На основі структурної схеми складемо «дерево відмов» (рис. 4), за правилом Моргана, коли послідовне з'єднання елементів у логічній структурі «дерева» з'єднується логічним знаком «або», паралельні з'єднання – знаком «і» [7].

Щоб зменшити ризик технічної системи, а значить, підвищити надійність її роботи, розрахуємо ймовірність відмови всієї системи за формулами для послідовного і паралельного з'єднання

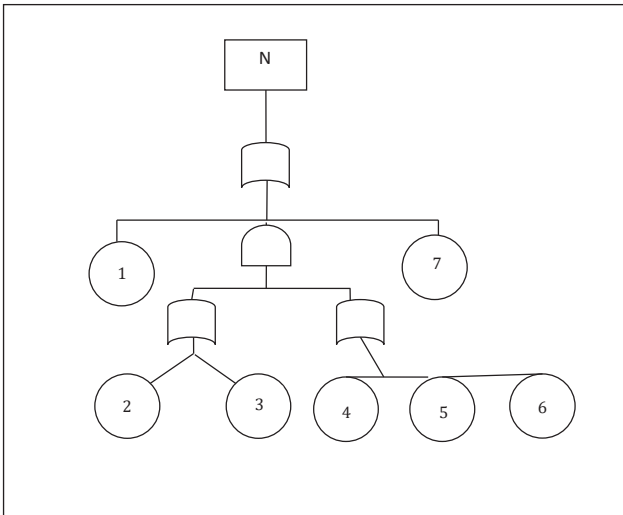


Рис. 4. «Дерево відмов» (елемент А): 1 – відмова заземлення трансформатора; 2 – відмова заземлення інструмента; 3 – пробій ізоляції електропроводки; 4 – відмова трансформатора; 5 – відмова автоматів струмового захисту; 6 – пробій кабельної лінії; 7 – відмова зануленого провідника (обрив)

елементів, попередньо вимірюємо опір ізоляції проводу (за перевищення допустимого за нормами ПУЕ не менше 2 МОм).

Розрахунок ймовірності відмови системи виконуємо за новим значенням найслабшого елемента 3 (підвищення надійності шляхом зменшення ймовірність відмови в 5 разів, з 0,82 до 0,164) за формулами (3) і (4) і відповідно [7]:

$$R = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_{X_i}) \text{ для «АБО»}, \quad (3)$$

$$R = \prod_{i=1}^n R_{X_i} \text{ для «І»}. \quad (4)$$

Ймовірність відмови системи, без підвищення надійності заземлення:

$$R_N = 1 - (1 - Q_1)(1 - Q_7)(1 - (1 - Q_2) Q_3 (1 - (1 - Q_4)(1 - Q_5)(1 - Q_6))) \quad (5)$$

$$R_N = 1 - (1 - 0,0128)(1 - 0,0086)(1 - (1 - 0,57 \cdot 0,82(1 - (1 - 0,0086) \times (1 - 0,025)(1 - 0,0017))) = 3,6 \cdot 10^{-4}$$

Ймовірність відмови системи з підвищенням надійності найслабшого елемента дорівнює $R_N = 3,0 \cdot 10^{-4}$. Для розглянутого прикладу зменшення надійності елементів 2 і 3 окремо або в сукупності може призвести до зниження надійності всього об'єкта. Проте велика порівняно зі слабкими елементами надійність елементів 1, 4, 5, 6 і 7 не унеможливує вихід їх із ладу.

Так, відомо, що обмотки трансформатора захищені емалевою ізоляцією, а також є головна ізоляція, яка всю обмотку загалом відокремлює від

інших частин електроустановки і захищає споживача. Але виткова ізоляція може бути легко пошкоджена, наприклад, механічно, під час намотування обмотки, під впливом нагрівання в процесі роботи. Утворюється металевий контакт двох сусідніх витків, утворюється короткозамкнений виток, в якому змінне магнітне поле електричної машини створить дуже великий струм, що призводить до плавлення ізоляції і появи на корпусі машини напруги, небезпечної для людини [3].

З огляду на дуже велику надійність пристроїв захисного відключення, ураження електричним струмом можливе тільки тоді, коли людина буде стояти на діелектрику і однією рукою візьметься за силовий кабель, а іншою – за «нейтраль». У такому разі пристрій не зможе відрізнити людину від «правильного» навантаження.

Висновки. За наведеними методиками розрахунку, відповідно до вступних даних інтенсивностей елементів технічної системи й апріорних значень імовірностей на рівні прикладу, отримані ймовірності відмов елементів, необхідних для побудови сценарію виникнення аварійної ситуації – ураження електричним струмом під час роботи з електроінструментом.

Проведені дослідження дозволяють запропонувати такі технічні й організаційні заходи щодо підвищення надійності слабких елементів технічної системи на стадії їх проектування, створення і використання:

- на стадії проектування необхідно використовувати стандартизовані й уніфіковані вузли та деталі;
- у процесі експлуатації враховувати зовнішні умови: передбачити вплив екстремальних температур – можливого нагрівання провідників, вібрації, ударного навантаження, вологості повітря;
- на пристрої заземлення необхідно мати паспорт із датами перевірок опору й обліком відхилень від норм;
- необхідно використовувати більш зносостійкі матеріали (наприклад, для провідників заземлення (опором не більше 0,1 Ом);
- використовувати пробивну машину з підвищеною напругою для випробувань електропроводки електроустановки та складанням плану обліку відмов;
- складати графіки вимірювання опору ізоляції електропроводки під час навантаження мережі і без нього, з перевіркою відповідності нормам (ПУЕ).

Автори будуть вивчати розглянуту проблему шляхом побудови реляційної моделі таблиць рішень у програмному середовищі системи управління базами даних Microsoft Office Access 2007 із використанням мови програмування SQL, запитів до баз даних для потреб автоматизації аналізу різноманітних технічних систем, що дозволить визначити виходи технічних систем і отримувати звіти варіантів комбінацій «входів – виходів» за аварійними або нормальними режимами.

Список літератури:

1. ДСТУ Б А.3.2–13:2011. Будівництво. Електробезпе́чність. Загальні вимоги. Київ, 2012. ГОСТ 12.1.013–78, MOD.
2. Белов П. Системный анализ и моделирование опасных процессов в техносфере. Москва: Издательство Академии гражданской защиты МЧС РФ, 2003. 109 с.
3. Манойлов В. Основы электробезопасности. Ленинград: Энергоатомиздат, 1991. 480 с.
4. Методика визначення ризиків та їх прийнятних рівнів для декларування безпеки об'єктів підвищеної безпеки. Затверджено наказом Міністерства праці та соціальної політики України від 4 грудня 2002 р. № 637.
5. Правила улаштування електроустановок / Міністерство Міненерговугілля України. Видання офіційне. Харків: Видавництво «Форт», 2017. 760 с.
6. Примірна інструкція з охорони праці під час виконання робіт ручним електроінструментом. ПІ 2.1.00–107–2000.
7. Стариков В. Оценка безопасности систем «человек – машина – среда» логико-вероятностным методом. Тюмень: ТюмГНГУ, 2002. Ч. 1. 29 с.
8. Сугак Е. Надежность технических систем и техногенный риск. Надежность технических систем / А. Кучкин, Е. Бельская, 2013. Ч. 2. 413 с.
9. Хенли Э.Дж., Кумамото Х. Надежность технических систем и оценка риска. Москва: Машиностроение, 1984. 528 с.

АНАЛИЗ БЕЗОПАСНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Изучение элементов технической системы с позиций надежности позволяет провести анализ их работы и сформировать выводы об эффективности системы. Предложено технические и организационные меры по повышению надежности элементов технической системы на стадии их проектирования, создания и использования. Это ценно для организации технологических процессов при быстрой смене режимов эксплуатации, требований производства к надежности производственных объектов. Ведь уменьшение надежности элементов системы непременно ведет к увеличению вероятности возникновения аварийных ситуаций. Величина риска аварий оценена с использованием теории надежности технических систем и выявления последовательности опасных ситуаций.

Ключевые слова: *риск, опасная ситуация, авария, надежность, электроинструмент, техническая система.*

SAFETY AND RELIABILITY ANALYSIS OF THE ELEMENTS OF A TECHNICAL SYSTEM

The study of the technical system elements from the stand point of reliability allows to analyze their work and form conclusions about the system efficiency. The proposed technical and organization al proposals for improving the reliability of the technical system elements at the stage of their design, creation and use. This is valuable for the organization of technological processes with the rapid change operating modes, production requirements to the production facilities reliability. Because reducing the reliability of system elements necessarily leads to an increase in the likelihood of emergencies. The magnitude of the accident risk is estimated using the reliability theory of technical systems and the detection of a hazardous situation sequence.

Key words: *risk, dangerous situation, accident, reliability, power tool, technical system.*

ЕЛЕКТРОНІКА

УДК 621.382

Михайленко И.В.

Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

Орлов А.Т.

Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

Сердега Б.К.

Институт физики полупроводников имени В.Е. Лашкарева
Национальной академии наук Украины

ИНТЕГРАЛЬНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ДАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ЭФФЕКТА ПОПЕРЕЧНОЙ ТЕНЗОЭДС

Рассмотрены ключевые требования к промышленному преобразователю давления средней точности. Изложен физический принцип функционирования преобразователя в случае биполярной и монополярной проводимостей полупроводникового кристалла. Проанализированы компоненты погрешности преобразователя и их источники. Предложена оптимальная конфигурация чувствительного элемента интегрального преобразователя давления. Оптимизированы топология упругого элемента и конструкция интегрального преобразователя давления.

Ключевые слова: интегральный преобразователь давления, эффект тензоэдс, мезаструктура, тензопреобразователь, концентраторы напряжения.

Постановка проблемы. Производство полупроводниковых преобразователей для общепромышленного применения возможно исключительно серийным их изготовлением средствами современной микроэлектронной технологии. В таком случае на первый план при массовом применении интегрального преобразователя давления (далее – ИПД) выходит вопрос разработки прибора среднего класса точности. Последняя определяется динамическим диапазоном измеряемой величины, высокой надежностью, сроком службы и стабильностью характеристик преобразования во времени, а также минимизацией разброса параметров в серии [1].

В результате функциональной интеграции, характерной для ИПД, традиционное деление прибора на узлы теряет смысл. Все же для описания функциональных элементов ИПД будут использованы термины «чувствительный элемент» (далее – ЧЭ), «упругий элемент» (далее – УЭ),

«первичный» и «вторичный» преобразователи, отдавая дань их условности.

Анализ последних исследований и публикаций. В настоящее время наиболее распространены в ИПД, как и в дискретных применениях, тензорезисторные мостовые схемы. Из множества их вариантов [2–4] наиболее совершенными стали преобразователи [5–7], объединяющие четыре резистора моста в один элемент электронной цепи. Встроенный средствами интегральной технологии (диффузией, имплантацией) в упругий элемент механики – кремниевую мембрану, он становится неотъемлемой ее частью. Физические основы их функционирования подробно рассмотрены в [8], а здесь представим только принцип функционирования и схему, необходимые для систематизации источников погрешностей.

Постановка задания. Целью работы является проведение анализа физико-технических источ-

ников погрешности ИПД и рассмотрение путей повышения его класса точности.

Изложение основного материала исследования. Физические основы тензоэффекта в кристаллах Ge, Si.

Принцип действия тензопреобразователя (далее – ТП) основан на появлении в кристаллах анизотропии проводимости, индуцированной внешним механическим усилием. На рис. 1 показана схема ТП в виде ограниченного кристаллического образца с биполярной электропроводностью, в котором анизотропия создана одноосной деформацией в x-направлении. Детальное рассмотрение теоретических основ возникновения тензоэдс при прохождении электрического тока через анизотропный кристалл изложено в [8]. Здесь ограничимся только изложением уравнения, описывающего протекание тока в образце, в котором главной особенностью является присутствие коэффициента при третьем слагаемом ax_y :

$$\frac{\partial p}{\partial t} - D \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} - a_{xy} \frac{eD}{2kT} E_x \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{p - p_i}{\tau} = 0. \quad (1)$$

Его физический смысл состоит в определении величины анизотропии проводимости:

$$a_{yx} = \frac{u_{xy}^n}{u_{yy}^n} - \frac{u_{xy}^p}{u_{yy}^p}, \quad (2)$$

которая состоит в разности отношений парциальных компонент подвижностей электронов и дырок u_{xy}/u_{yy} . Кристаллографическая ориентация выбирается так, чтобы соотношение (2) $a_{xy} \neq 0$, что достигается, когда диагональные компоненты тензора проводимости (подвижности электронов u_{max}^n и дырок u_{max}^p) не совпадают с направлением внешнего поля. На рис. 1 изображена его модель, в которой электрическое поле \vec{E}_x и сжимающее усилие приложено в направлении $0x$. Поскольку направление поля заведомо не совпадает с направлениями максимальных подвижностей, то, вследствие отклонения плотности тока J_{xy} от коллинеарности относительно вектора поля, возникает поперечный поток электронов и дырок или только одного из них. В случае биполярной проводимости (собственной, инжектированной светом или контактом) возникает эффект поперечного потока носителей заряда и их локализации у одной из боковых поверхностей образца. Однако в образовавшемся неоднородном распределении концентрации носителей отсутствует поперечная компонента электрического поля \vec{E}_y вследствие компенсации заряда противоположными знаками. В таком случае тензоэффект заключается в изменении величины тока J_x , который зависит не только от величины деформации (параметра a_{xy}), согласно (2), но

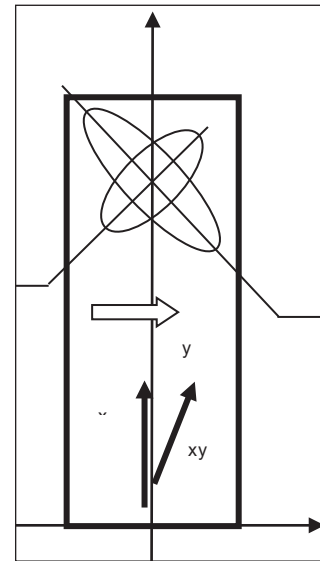


Рис. 1. Схема возникновения поперечной анизотропии проводимости в образце изотропного кристалла кремния под действием одноосного упругого сжатия вдоль оси $0X$

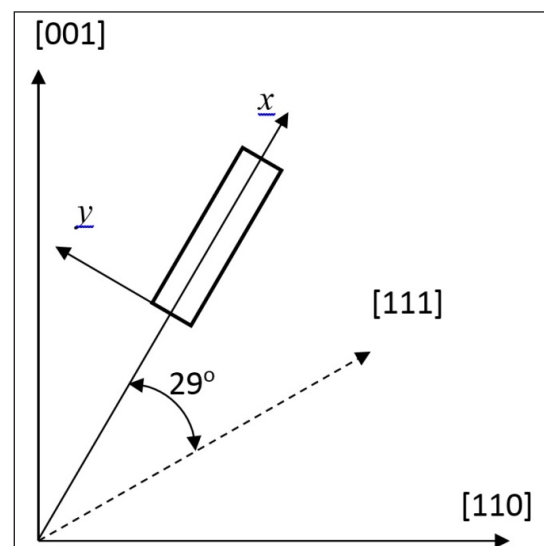


Рис. 2. Оптимальная кристаллографическая ориентация кристалла в случае монополярной проводимости в дискретном ТП

и в значительной степени от рекомбинационных свойств $\pm u$ -поверхностей образца. Рассмотрим два случая монополярной проводимости. В первом из них, характерном для дискретного ТП, направления деформации и тока от приложенного поля коллинеарны (рис. 2) [9]. Здесь условие (2) $a_{xy} \neq 0$ выполняется в силу того, что направление ориентации образца находится под углом к кристаллографическим осям высокой симметрии. Понижение симметрии одноосной деформацией приводит к появлению эллипсоида проводимости, главные оси которого не совпадают с направлением тока. Воз-

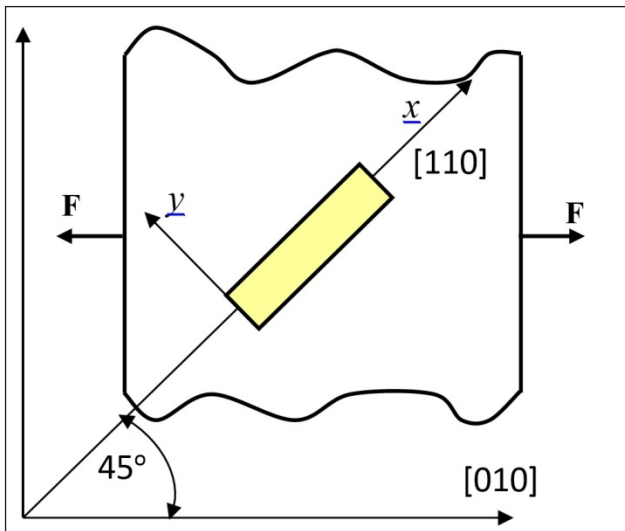


Рис. 3. Оптимальная кристаллографическая ориентация кристалла в случае монополярной проводимости для интегрального ТП.
F – сила внешней среды, обеспечивающая одноосную деформацию

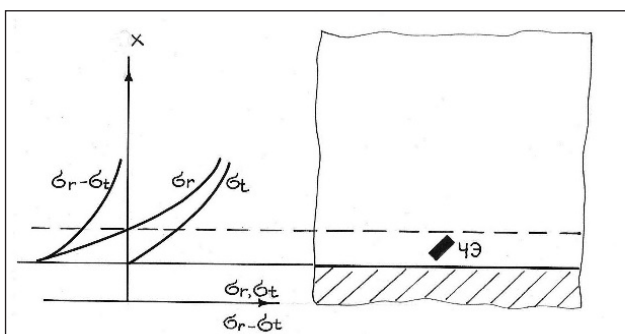


Рис. 4. Эпюры напряжений на периферии плоской мембраны

никновение вследствие этого поперечного потока носителей приводит к появлению разности потенциалов в y -направлении, которая является мерой анизотропии. Следует обратить внимание на то, что оптимальная ориентация ТП требует его расположения на кристаллографической плоскости типа (110), которая обычно не используется в стандартных пластинах-подложках (wafers), изготовленных по кремниевой микроэлектронной технологии.

Отмеченное обстоятельство учтено во втором случае топологического размещения ТП (рис. 3), который является предпочтительным по причине распространенного использования кристаллической плоскости с индексами (100). Однако при этом условии неколлинеарность направлений тока и деформации является обязательной и, для максимального эффекта, должна составлять угол 45° относительно осей кристалла типа [100]. Такое

условие осуществимо практически интегрированием ЧЭ ТП в кремниевую пластину. Такая пластина является упругим элементом механики, преобразующим распределенное давление измеряемой среды в одноосную деформацию. ЧЭ располагается либо на ее периферии, где радиальная компонента деформации не равна нулю, либо в том месте, в котором специальный профиль удовлетворяет требуемым условиям.

Источники погрешностей и их анализ.

Одним из уязвимых мест тензорезисторных ИПД является то, что четыре тензорезистора принципиально должны располагаться в различных местах мембраны. При этом неоднородное изменение механических напряжений с температурой по контуру прикрепления упругого элемента к корпусу датчика или локальных напряжений на границе кремний – окисел (или кремний – нитрид), а также возможная пространственная неоднородность токов утечки на границе тензорезистор – подложка могут стать причиной более или менее значительного дрейфа нуля вследствие неодинакового изменения сопротивлений тензорезисторов. Точность согласования характеристик отдельных тензорезисторов, являясь в ИПД весьма высокой, все же остается конечной, что дополнительно приводит к увеличению аддитивной составляющей выходного сигнала.

Неидеальности ИПД выражаются, как и в случае дискретных преобразователей, в следующих проявлениях:

- изменение чувствительности ИПД с температурой – мультипликативная компонента;
- температурный и временной дрейф нулевого сигнала ИПД – аддитивная квазистационарная компонента;
- шумовая составляющая выходного сигнала – аддитивная нестационарная компонента;
- нелинейность характеристики ИПД.

Наиболее актуальной для снижения приведенной погрешности является задача минимизации второй из перечисленных составляющих, поскольку остальные три в различных приложениях могут являться некритичными либо быть относительно легко скомпенсированы во вторичном преобразователе. Большинство опытных и промышленных образцов ИПД, разработанных в Украине и за рубежом, характеризуются значительным дрейфом нулевого сигнала, достигающим 10...30% от значения номинального сигнала в диапазоне температур $-40...+120^\circ\text{C}$ [2; 3; 4; 5]. Минимизация аддитивной составляющей выходного сигнала и ее зависимости от дестабилизиру-

ющих факторов, являясь проблемой в дискретных преобразователях, усугубляется в ИПД широкого применения по двум причинам. Во-первых, функциональная интеграция и сокращение размеров ИПД приводит к повышению взаимных зависимости и влияния элементов (областей) ИПД. Второй причиной является тенденция сведения к минимуму индивидуальных операций при изготовлении и настройке ИПД и, в идеале, исключение последних. С другой стороны, групповые методы изготовления ИПД дают разработчику уникальную возможность унификации и согласования параметров элементов и отдельных преобразователей в партии.

В настоящей работе снижение аддитивной составляющей выходного сигнала ИПД достигается следующими мерами:

- выбором соответствующего принципа действия и конфигурации первичного преобразователя;
- оптимизацией топологии и конструкции упругого элемента ИПД, технологии его изготовления;
- тщательным выбором способа сборки и средств крепления ИПД к внешним конструктивным элементам (заделка ИПД).

Анализ литературных данных показывает, что игнорирование любого из этих факторов может свести на нет эффект учета остальных. Из этого следует вывод о том, что разработка ИПД среднего класса точности (1%) для массовых применений, работающих в широком температурном диапазоне, требует комплексной и взаимосвязанной оптимизации принципа действия первичного преобразователя, топологии ИПД в целом, технологии изготовления и сборки приборов. Применение соответствующих методов обработки выходного сигнала во вторичном преобразователе [6; 7] можно рассматривать как хорошее дополнение к исходной оптимизации, обеспечивающее дальнейшее повышение метрологических характеристик ИПД.

Перечисленные соображения определяют задачи разработки интегрального преобразователя давления для общепромышленных применений.

Выбор типа чувствительного элемента интегрального преобразователя давления. ТП изготавливается из полупроводника с определённой кристаллографической ориентацией, обеспечивающей максимальное значение параметра анизотропии, а с ним и чувствительности ТП. В [12] показано, что абсолютный максимум модуля

тригонометрического полинома, определяющего ПА, достигается, например, при ориентации по рис. 2:

$$\begin{pmatrix} 0,305 & 0,305 & 0,902 \\ -0,638 & -0,638 & 0,432 \\ 0,707 & -0,707 & 0 \end{pmatrix}$$

Помимо абсолютных экстремумов рассматриваемая функция имеет ряд локальных экстремумов. Из них представляет практический интерес семейство экстремумов, расположенных в двенадцати направлениях, при которых преобразователь расположен в плоскости типа (100) по рис. 3, описываемых матрицей:

$$\begin{pmatrix} 0,924 & 0,383 & 0 \\ -0,383 & -0,924 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

По приведенным выше соображениям для реализации ТП в интегральном исполнении был выбран второй тип ориентации, как более практичный, хотя и уступающий абсолютному максимуму чувствительности, достигаемому в первом случае на 12%.

По сравнению с тензорезисторными мостовыми схемами ЧЭ ИПД на основе эффекта тензоэдс (далее – ИТЭПД) имеет следующие преимущества:

1. ЧЭ не проявляет температурного дрейфа выходного сигнала в отсутствие деформации, если технологически была достигнута эквипотенциальность выходных электродов (симметрия ЧЭ). Это означает, что для ИТЭПД, не соединенного с корпусом, аддитивная компонента выходного сигнала практически отсутствует.

2. В отличие от тензорезисторного моста, ЧЭ не чувствителен к изотропной поверхностной деформации, возникающей в связи с разницей в ТКР кремния и диэлектрических покрытий, а также к симметричной поверхностной деформации в направлении [100], если поверхность пластины совпадает с плоскостью (100), вследствие эффекта Пуассона.

3. Поскольку ЧЭ является генератором напряжения, при использовании его в режиме, близком к режиму холостого хода, по выходу число контактов, вносящих шумовую компоненту в выходной сигнал, составляет два против восьми в тензорезисторном мосте. Кроме того, дрейф сопротивления контактов в таком ЧЭ не приводит к дрейфу аддитивной компоненты выходного сигнала.

4. ЧЭ является локальным функциональным аналогом тензорезисторного моста и поэтому его эквипотенциальность в отсутствие давления, кроме геометрических факторов, определяется

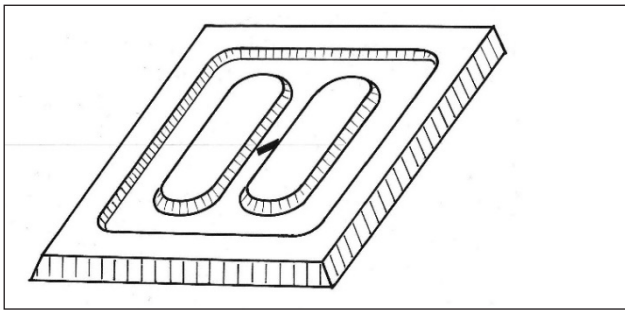


Рис. 5. Форма упругого элемента ИТЭПД – мезаструктура. Пропорции не соблюдены

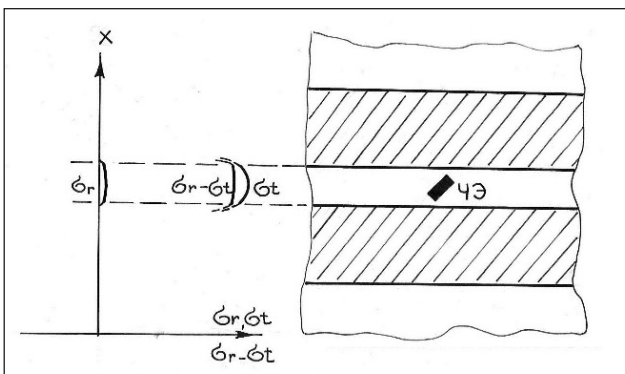


Рис. 6. Эпюры напряжений между островками-концентраторами

однородностью диффузии или имплантации на площади самого преобразователя, а не всей площади мембраны, как в случае распределенного тензорезистивного моста [12]. Таким образом, при типичных размерах мембраны $2\ 000 \times 2\ 000\ \mu\text{м}^2$ и ЧЭ $100 \times 200\ \mu\text{м}^2$ получается выигрыш по этому фактору по крайней мере на порядок.

Единственное, в чем ИТЭПД уступает ИПД с четырехплечим активным тензорезисторным мостом, – это вдвое меньшая, при прочих равных условиях, чувствительность.

Приведенные соображения позволяют сделать вывод, что преобразователи на основе эффекта тензоэдс наиболее перспективны для интегральных датчиков давления в связи с отсутствием в их характеристиках ряда существенных недостатков, присущих тензорезисторным мостам [13–15]. Подтверждение сказанного – приемлемые параметры единственного серийно выпускаемого интегрального датчика давления на основе эффекта тензоэдс [2; 3].

Оптимизация топологии упругого элемента и конструкции интегрального преобразователя давления. Основным для ИТЭПД условием высокой эффективности преобразования давления в пропорциональный электрический сигнал явля-

ется максимальная разность продольной и поперечной компонент механического напряжения в области расположения ЧЭ. Как уже отмечалось, в случае ориентации преобразователя по рис. 3 соответствующие компоненты должны быть направлены вдоль осей $\langle 110 \rangle$, а тянущее поле прикладывается в направлении $\langle 100 \rangle$. Такое взаимное расположение направлений деформации и тянущего поля дает по сравнению с коллинеарным случаем выигрыш по чувствительности в 1,41 раза. Наиболее простая реализация этих условий – выбор соответствующей области на периферии однородной плоской мембраны для размещения ЧЭ – использован в [10]. При таком решении ЧЭ располагается в области существенно неоднородной деформации (рис. 4). Высокие градиенты радиальной и тангенциальной компонент механического напряжения и зависимость эпюр напряжения от глубины травления обуславливают критичность к точности позиционирования ЧЭ. Это обстоятельство, а также подверженность влиянию механических напряжений, возникающих на периферии упругого элемента, заставляют искать другие решения.

Эффективность преобразования гидростатического давления в одноосное напряжение можно повысить, используя в качестве упругого элемента мембрану сложного профиля с концентраторами напряжения [16–18]. Реализация такого подхода определила выбор в качестве упругого элемента ИТЭПД симметричной мембраны с двумя островками – утолщениями, играющими роль концентраторов. На рис. 5 условно показана ее форма. ЧЭ расположен в центре мембраны между островками, его продольная ось составляет 45° с осью симметрии мембраны. Такая конфигурация обеспечивает эффективное преобразование давления измеряемой среды в одноосное напряжение и в то же время максимально возможную удаленность первичного преобразователя от области возникновения термоупругих напряжений на периферии мембраны. Градиенты продольной и поперечной компонент механического напряжения в центральной области такого УЭ близки к нулю (рис. 6), что значительно снижает требования к точности позиционирования ЧЭ по сравнению с [10]. Аналитический расчет трехмерного УЭ со сложным профилем, учитывающий анизотропию механических свойств кремния, требует высокоресурсных вычислений по методу конечных элементов, поэтому оптимизация микропрофиля мембраны производилась эмпирически, на основании приближенных расчетов.

Следствием отмеченного во введении процесса физико-конструктивной интеграции преобразователей и специфической особенностью ИПД является существенное влияние конструкции ИТЭПД на его параметры. Неудачно выбранный метод крепления первичного преобразователя к корпусу или несогласованные коэффициенты расширения материалов корпуса и упругого элемента служат источниками аддитивной погрешности. Эффективными методами минимизации погрешностей, связанных с эффектами температурного расширения, является соединение кремниевой мембраны с кремниевой же подложкой [14] или со стеклянной подложкой с подобранным температурным коэффициентом расширения (далее – ТКР) по отношению к кремнию. Немаловажным фактором является также и форма подложки, а именно, ее жесткость, приведенная к контуру крепления, которая должна соответствовать жесткости упругого элемента.

С учетом этих соображений наиболее рациональной представляется конструкция ИТЭПД, состоящая из двух соединенных пластин кремния, каждая из которых имеет вытравленные участки – т. н. мезаструктура (рис. 7). При изготовлении преобразователя абсолютного давления соединение производится в вакууме. В центре одной из пластин, которая является УЭ, располагается ЧЭ, а на ее периферии – термочувствительный элемент схемы термокомпенсации. На поверхности второй пластины, которая является крышкой, вытравливается полость, совпадающая по размерам с наружным контуром мембраны. Толщина тонкой части крышки выбирается из соображений жесткости, которая должна приближаться к жесткости чувствительного элемента [11]. К внешним конструктивным элементам ИТЭПД крепится внешней поверхностью крышки с помощью резиноподобного компаунда.

Такая конструкция обеспечивает подавление в зоне расположения ЧЭ термоупругих напряжений, возникающих по контуру скрепления пластин. Дополнительное снижение механических напряжений обеспечивает двойная оправа УЭ (экранный кольцо) [20] (на рис. 4.3 и 4.4 не показана). Последняя на порядок снижает воздействие температурных деформаций по контуру скрепления на выходной сигнал ИТЭПД. Неизбежная при этом потеря жёсткости, а с ней и перегрузочной способности упругого элемента [10], частично компенсируется за счет наличия островков от области возникновения концентраторов [13].

Результаты испытаний тестовых образцов. Различные варианты предлагаемой техно-

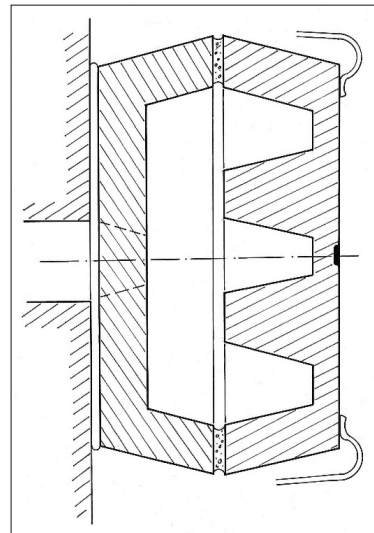


Рис. 7. Поперечное сечение ИТЭПД предлагаемой конструкции. Пропорции не соблюдены

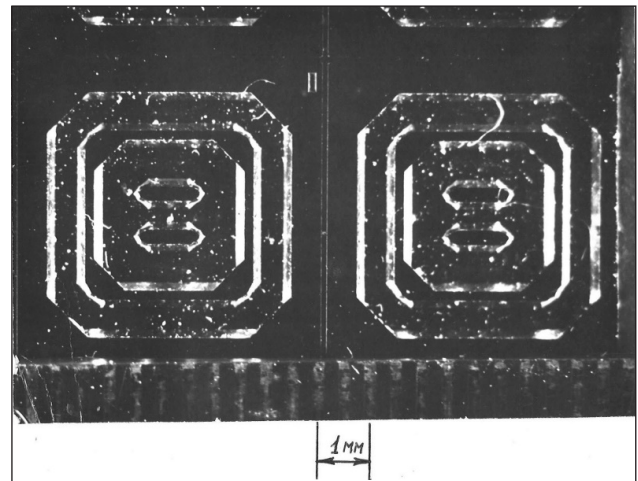


Рис. 8. Мезаструктуры ИТЭПД, полученные щелочным анизотропным травлением

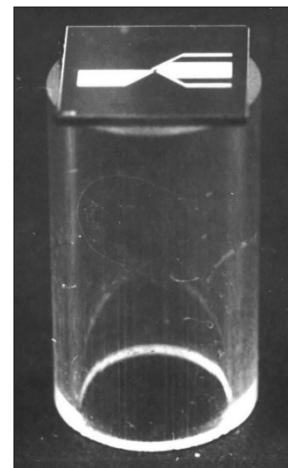


Рис. 9. Закреплённый ИТЭПД

логии были опробованы в следующих организациях: ИП АН УССР; ПО «Кристалл», г. Киев; НИИ «Шторм», г. Одесса; НПО «Интеграл», г. Минск. В результате, были изготовлены и испытаны тестовые партии ИТЭПД.

На рис. 8 и 9 приведены микрофотографии изготовленных структур и ИТЭПД, закрепленного на трубке из боросиликатного стекла с помощью технологии, описанной в [21].

Чувствительность ИТЭПД с мембраной толщиной 100 мкм и рабочим диапазоном давлений 0...1 МПа оказалась равной 0,02 1/МПа при напряжении питания 5 В. Значение нулевого сигнала при 300 К для большинства испытанных образцов составило 0,5...1,5 мВ. Дрейф нулевого сигнала для 90% ИТЭПД, не соединенных с корпусом, составил менее 1 мВ в диапазоне температур 233...393 К, причем два образца обнаружили дрейф порядка 0,2 мВ. При соединении с корпусом дрейф нулевого сигнала возрастал до 2 мВ в том же диапазоне температур, что

составляет 2% от выходного сигнала 100 мВ при номинальном давлении 1 МПа. При испытании на перегрузку УЭ разрушение мембраны наступало при 2,0 МПа, т. е. при 100%-ной перегрузке. Таким образом, результаты испытаний пробных образцов подтвердили эффективность принятых физико-технологических решений, обеспечивших достаточно высокие параметры предлагаемого ИТЭПД.

Выводы:

1. Рассмотрены физические основы ЧЭ ПД и предложен тип ЧЭ на основе тензоэдс как оптимальный с точки зрения реализации ИПД.

2. Рассмотрены источники погрешности ИПД и намечены пути их конструктивной минимизации.

3. На основе комплексной физико-конструктивно технологической оптимизации ИПД предложены топология упругого элемента, конструкция и способ сборки ИПД с рабочим диапазоном давлений 0...1 МПа в диапазоне температур 233–393 К, с погрешностью < 2%.

Список литературы:

1. Barlian A., Park W-T., Mallon J., Rastegar A., Pruitt B. Review: Semiconductor piezoresistance for microsystems. Proc IEEE Inst Electr Electron Eng. 2009. №97(3). P. 513–552. DOI:10.1109/JPROC.2009.2013612.
2. Borney J., Wise K. Integrated signal conditioning for silicon pressure sensors. IEEE Transactions on Electron Devices. 1979. Vol. ED-26. № 12. P. 1906–1910.
3. Стучебников В. Полупроводниковые интегральные тензорезисторные преобразователи механических величин. Измерения, контроль, автоматизация. 1983. № 1 (45). С. 30–42.
4. Ваганов В. Интегральные тензопреобразователи. М.: Энергоатомиздат, 1983. 136 с.
5. Жадько И., Романов В., Сердега Б. Полупроводниковый датчик механических усилий. А.С. № 439690. 1972.
6. Бабичев Г., Ваганов В., Жадько И., Романов В., Сердега Б. Интегральный преобразователь давления. Авт. свид. № 1438404. 1987.
7. Гридчин В., Круглов В. Интегральный тензопреобразователь на поперечной тензоэдс. Физика и техника полупроводников: сборник научных трудов / МВ и ССО РСФСР. НЭТИ. Новосибирск. 1976.
8. Бойко И., Жадько И., Рашба Э., Романов В. Возникновение неравновесных носителей при прохождении тока через упруго деформированный германий. Физика твердого тела. 1965. Т. 7. Вып. 7. С. 2239–2242.
9. Жадько И., Романов В., Сердега Б. Тензодатчик. Авт. свид. № 401291. Опубл. 22.02.77. Бюллетень ОИПОТЗ. № 7.
10. Аллен Р. Крестообразный датчик давления. Электроника. 1980. № 21. С. 9–10.
11. Аллен Р. Новые области применения кремниевых полупроводниковых датчиков. Электроника. 1980. № 24. С. 28–41.
12. Ваганов В. Интегральные тензопреобразователи. М.: Энергоатомиздат, 1983. 136с.
13. Ваганов В., Немчинов В. Основные направления применения микропроцессоров с датчиками. Датчики на основе технологии микроэлектроники: материалы семинара. М. 1983. С. 33–37.
14. James J. Allen. Micro Electro Mechanical System Design. 2005. CRC Press. 496 p.
15. Pearson G., Reed W., Feldman W. Deformation and fracture of small silicon crystals. Acta Metallurgica. 1957. Vol. 5. P. 181.
16. Wilner L.B. A diffused silicon pressure transducer with stress concentrated at transverse gauges. ISA Transactions. 1978. Vol. 17. № 1. P. 83–91.
17. Kim S.-C., Wise K. Temperature sensitivity in silicon piezoresistive pressure transducers. IEEE Transactions on Electron Devices. 1985. Vol. ED-50. № 7. P. 801–810.
18. Поливанов П. Кремниевый мембранный чувствительный элемент с двойной оправой. Приборы и системы управления. 1979. № 7. С. 30.

19. Broeks A., Donovan R., Hardesty C. Low-temperature electrostatic silicon-to-silicon seals using sputtered borosilicate glass. *Journal of Electrochemical Society*. 1972. Vol. 119. № 4. P. 545–546.

20. Mikhailenko I., Orlov A., Serdega B. Diagnostics of thermal stress in MEMS pressure transducer based on Tenso-e.m.f. Effect. *Proceedings of the 2017 IEEE 37th International Scientific Conference “Electronics and nanotechnology” (ELNANO-2017)*. Kyiv: IEEE, 2017, P. 201–204.

21. Михайленко І., Орлов А., Сердега Б. Модуляционно-поляризационная диагностика термонапряжений в интегральном преобразователе давления. *Физика и техника полупроводников*. Вып. 4. 2017. С. 524–528. DOI: 10.21883/000000000000.

ІНТЕГРАЛЬНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ ТИСКУ НА ОСНОВІ ЕФЕКТА ТЕНЗОЕРС

Розглянуті ключові вимоги до промислового перетворювача тиску середньої точності. Проаналізовані компоненти погрішності перетворювача та їхні джерела. Запропонована оптимальна конфігурація чутливого елемента інтегрального перетворювача тиску. Оптимізовані топологія пружного елемента та конструкція інтегрального перетворювача тиску.

Ключові слова: інтегральний перетворювач тиску, первинний та вторинний перетворювачі, ефект тензоерс, тензоперетворювач, мезаструктура, концентратори напруги.

INTEGRATED SILICON PRESSURE TRANSDUCER BASED ON TENSO-EMF EFFECT

Reviewed key requirements for industrial pressure transducer of medium accuracy. Analyzed measurement error components and their origins. Proposed optimal configuration of sensitive element of integrated pressure transducer. Optimized topology of the elastic element and the integrated pressure transducer design.

Key words: integrated pressure transducer, primary and secondary converter, tenso-emf effect, tenso-transducer, mesa-structure, isles-concentrators of strain.

УДК 57.087

Удовиченко Є.Є.Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Попов А.О.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Чайковський І.А.**Інститут кібернетики імені В.М. Глушкова
Національної Академії наук України

МЕТОД КЛАСИФІКАЦІЇ КАРТ РОЗПОДІЛУ ГУСТИНИ СТРУМУ В МІОКАРДІ, ЗАСНОВАНИЙ НА КОРЕЛЯЦІЙНОМУ АНАЛІЗІ

Магнітокардіографія (далі – МКГ) – це метод вимірювання магнітних полів, породжених електричною активністю серця, із використанням надзвичайно чутливих пристроїв, таких, як надпровідний квантовий інтерференційний пристрій. Однією з переваг МКГ є можливість формування карт розподілу магнітного поля над грудною кліткою, до яких можуть бути застосовані математичні методи аналізу та класифікації. У роботі представлено метод класифікації карт розподілу густини струму, отриманих за допомогою МКГ, заснований на кореляційному аналізі. В експериментальній частині використано 2142 карти розподілу густини струму 247 пацієнтів. За допомогою запропонованого методу вдалося досягти точності класифікації в 95% для розподілу карт на 14 класів, що відповідають певному стану серцево-судинної системи.

Ключові слова: магнітокардіографія, карти розподілу густини струму, діагностика серцево-судинних захворювань, міокард, кореляційний аналіз.

Постановка проблеми. Неінвазивна діагностика серцево-судинних захворювань є одним із найважливіших завдань сучасної кардіології. Серед нових прогресивних методів діагностики важливе місце займає магнітокардіографія (МКГ) – метод неінвазивного електрофізіологічного дослідження серця, що полягає в безконтактній реєстрації й аналізі над грудною кліткою людини магнітного поля, породженого електричною активністю міокарда протягом серцевого циклу. Метод магнітокардіографії відомий більше 30 років [1; 2].

Як впливає з теорії електромагнетизму, будова джерела струму в електропровідному середовищі (організмі) і неоднорідність самого цього середовища по-різному відображаються на розподілі магнітних і електричних полів. Деякі види біоелектричної активності проявляють себе переважно в електричному полі, даючи слабкий магнітний сигнал, інші – навпаки. Тому є багато електрофізіологічних процесів у міокарді, спо-

стереження яких магнітографічно раціональніше. Незважаючи на тривале дослідження методу, масштабні дослідження з його використанням досі організовані не були.

МКГ нерозривно пов'язана з комп'ютерними інформаційними технологіями аналізу даних. Під інформаційною технологією слід розуміти послідовні перетворення початкового сигналу – «сировини технології» на кінцевий продукт – медичний висновок.

МКГ як відносно новий метод наразі не має стандартизованої системи критеріїв, на відміну, наприклад, від електрокардіографії (ЕКГ). Різні МКГ-лабораторії керуються дещо відмінними підходами до аналізу даних [3; 4].

Новим порівняно зі стандартною ЕКГ-процедурою є перехід від реєстрації одновимірних кривих у часі до МКГ-картування (побудови дво- або тривимірних динамічних карт), що дає можливість візуалізувати електрофізіологічний субстрат і його зміни в часі, наприклад, створити

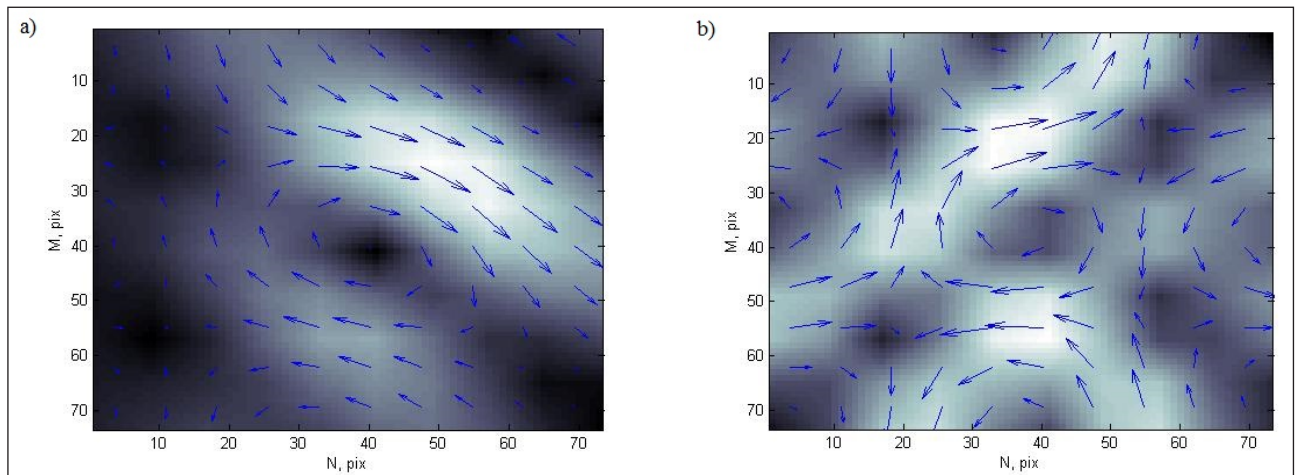


Рис. 1. Карта розподілу густини струму здорової людини (а) і хворого на ішемічну хворобу серця (б)

тривимірну візуалізацію електрофізіологічних процесів при аритміях. Однак насправді значущими переваги МКГ стають завдяки застосуванню комп'ютерних методів оброблення даних, насамперед двовимірних карт розподілу магнітного поля й розподілу густини струму в міокарді.

Аналіз МКГ-даних використовується для діагностики ішемічної хвороби серця [2], синдрому Вольфа-Паркінсона-Уайта [5] та інших захворювань. Карта розподілу струмів у серці, що включає в себе морфологічну інформацію про серце, може бути отримана шляхом проектування двовимірної (2D) карти векторів, що розраховується із сигналів магнітокардіографа, на тривимірну (3D) стандартну модель серця, що є спільною для всіх дорослих людей [6]. Одним із підходів до вивчення магнітного поля в серці людини є аналіз карт розподілу густини струму. Наразі математичним методам аналізу таких карт приділялося небагато уваги. Так, застосовувався аналіз незалежних компонентів (ІСА) для локалізації відображення густини струму [7], аналіз однорідності просторової структури карт [8], аналіз карт на основі визначення напрямку сумарного вектора для інтервалу ST-T [1], оцінка аномальності карти [9]. Загалом усі наявні методи аналізу карт розподілу густини струму в міокарді можна розділити на дві групи:

1) методи, засновані лише на оцінці кількісних характеристик карти, – не векторні величини, не завжди враховують структуру, тому можуть використовуватися лише для діагностики обмеженого кола станів серця;

2) методи аналізу, в основу яких покладений аналіз напрямку векторів, недосконалі за рахунок того, що в них не враховується структура карти.

Однак ці методи не застосовуються для класифікації, а лише слугують додатковою інформацією до візуального аналізу МКГ-карт для полегшення постановки діагнозу лікарем.

Постановка завдання. Завданням дослідження є розроблення нового методу, що враховує як кількісні, так і векторні характеристики для класифікації карт розподілу густини струму й автоматичної постановки діагнозу на основі кореляційного аналізу.

1. Класифікація карт розподілу густини струму на основі кореляційного аналізу.

1.1. Формування карт розподілу густини струму, отриманих за допомогою магнітокардіографії.

Для просторової реєстрації даних у магнітокардіографії використовуються спеціальні точки, що є вузлами перетину квадратної сітки й мають прив'язку до анатомічних орієнтирів на грудній клітці. Оскільки кількість вузлів обмежена, для локалізації областей патологічної активності міокарда й для побудови миттєвих карт розподілу магнітного поля в серці застосовується інтерполяція функції двох змінних у точках за межами стандартної сітки. Іншими словами, базуючись на усереднених МКГ-кривих, використовуючи алгоритми двовимірної інтерполяції, можна побудувати миттєві карти розподілу магнітного поля. Потім, застосовуючи алгоритм розв'язку «оберненої задачі», карти розподілу магнітного поля можна перетворити на миттєві карти розподілу густини струму (CDDM). Таким чином, кожна CDDM формується шляхом оброблення векторів густини струму, отриманих за допомогою МКГ.

Кожна CDDM – це дискретне зображення у відтинках сірого, розміром $M \times N$ пікселів, у якому

білий колір відповідає найбільшій яскравості (рис. 1). Таким чином, яскравість зображення відповідає величині густини струму у відповідній точці. CDDM будуються для визначених моментів часу з деяким кроком (до 10 мс) протягом Т-зубця QT – інтервалу електрокардіограми. Це дає можливість зіставити дані електрокардіографії (ЕКГ) із відповідними значеннями, порашованими з карт розподілу густини струму [10].

1.2. Формування характеристик карт розподілу густини струму в міокарді.

Кожна карта розподілу густини струму характеризується двома наборами величин: значення величини вектора густини струму та його напрямку для кожної з N точок, у яких проводяться магнітокардіографічні вимірювання. Таким чином, кожну з карт розподілу густини струму характеризують два вектори розмірністю $1 \times N$. При цьому значення нормуються за максимальною величиною.

1.3. Метод класифікації карт розподілу густини струму на основі кореляційного аналізу.

Розроблений метод класифікації карт розподілу густини струму на основі кореляційного аналізу полягає у знаходженні й порівнянні коефіцієнтів кореляції карти, що аналізується, із кожною з карт в еталонному наборі. Еталонний набір карт – набір попередньо класифікованих лікарем карт розподілу густини струму, кожна з яких належить до однієї з груп, що відповідають певному стану серцево-судинної системи. Для кожної з карт, що класифікуються, розраховуються коефіцієнти кореляції вектора величин і вектора напрямків із відповідними векторами кожної з карт із еталонного набору за формулою:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

де n – розмірність векторів, у нашому випадку $n = 100$

x_i, y_i – значення векторів, для яких розраховується коефіцієнт кореляції

\bar{x}, \bar{y} – середні значення величин векторів, розраховані так:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$$

Після цього значення отриманих коефіцієнтів кореляції для двох векторів перемножуються, і таким чином отримуємо результуючий коефіцієнт кореляції, в якому враховується як кореляція за модулем, так і за напрямком векторів густини струму. У підсумку для кожної карти отримуємо

набір результуючих коефіцієнтів кореляції з картами кожної з груп еталонного набору. Після цього для кожної групи формується масив із максимальних значень результуючого коефіцієнта кореляції й знаходиться їх середнє значення. Таким чином, для кожної карти отримується мапа, ключами якої є групи, що відповідають стану серцево-судинної системи, а значеннями – вищеописані середні значення максимальних коефіцієнтів кореляції. Максимальне із цих значень указує на групу, до якої повинна бути віднесена карта розподілу густини струму, що класифікується.

2. Результати експерименту.

2.1. Підготовка експериментальних даних.

Для дослідження було використано 2142 карти розподілу густини. Кожна карта віднесена до одного з 14 класів залежно від стану серцево-судинної системи пацієнта, котрому вона належить. Це такі класи: здорові добровольці, спортсмени, хворі на ішемічну хворобу серця різного рівня складності (де IBS-1 – найлегший випадок хвороби, а IBS-5 – найтяжчий), пацієнти з ушкодженнями міокарда, жінки й чоловіки, хворі на мікросудинні (дифузні) розлади та хворі на гіпертрофію лівого шлуночка різного рівня складності (де Нурег-1 – найлегший випадок хвороби, а Нурег-3 – найтяжчий). Кожна з груп характеризується специфічною структурою карт розподілу густини струму. Для крос-валідації було проведено 20 ітерацій класифікації, у кожній із яких із загального набору карт розподілу густини струму вибиралося 280 карт, по 20 із кожної групи, з яких формувався еталонний набір. Окрім того, у кожній ітерації подібним чином вибирався експериментальний набір карт, для якого й проводилася класифікація. Такий підхід зумовлений обмеженнями, пов'язаними з тим, що в первинній вибірці карт у кожній із груп знаходиться різна кількість карт, що змушує відштовхуватися від групи з мінімальною кількістю карт для формування врівноваженої вибірки карт для експерименту. Для оцінки класифікації були розраховані такі параметри: чутливість (TPR), специфічність (SPC) і точність (PPV і ACC) для кожного з класів. Ці параметри визначаються так:

$$TPR = \frac{TP}{P}$$

$$SPC = \frac{TN}{N}$$

$$PPV = \frac{TP}{TP + FP}$$

$$ACC = \frac{TP + TN}{P + N}$$

Тут TP – кількість CDDM людей, що належать до «позитивного» класу, визначених правильно,

Характеристичні величини класифікації для різних груп станів серцево-судинної системи

Group	Accuracy	Precision	Sensitivity	Specificity
HYPER1	0.93	0.52	0.86	0.94
HYPER3	0.95	0.61	0.85	0.96
NEGATIVEt	0.97	0.81	0.72	0.99
IBS3	0.94	0.56	0.74	0.96
DIFFm	0.94	0.79	0.15	0.99
IBS5	0.97	0.76	0.82	0.98
SPORT	0.95	0.69	0.56	0.98
DIFFf	0.95	0.74	0.39	0.99
IBS2	0.96	0.79	0.55	0.99
IBS1	0.96	0.77	0.61	0.99
REUMO	0.95	0.69	0.53	0.98
IBS4	0.96	0.7	0.9	0.97
HYPER2	0.93	0.52	0.61	0.95
NORMAL	0.94	0.58	0.7	0.96

TN – кількість CDDM людей, що не належать до «позитивного» класу, визначених правильно, P – загальна кількість CDDM людей, що належать до «позитивного» класу, N – загальна кількість CDDM людей, що не належать до «позитивного» класу.

Після всіх ітерацій класифікації було пораховано усереднене значення для кожної з груп і усереднені значення характеристичних величин загалом.

2.2. Результати та їх обговорення.

Усереднені значення характеристичних величин для кожної з груп описаного експерименту представлені в табл. 1.

Як видно з отриманих результатів, для кожної з груп характерна висока специфічність, у всіх випадках вища за 0,93, що в середньому становить 0,97. Це свідчить про те, що запропонований метод добре показує себе в класифікації карт, що не належать до «позитивного» класу. Середня чутливість запропонованого методу класифікації становить 0,64. Однак, як видно з табл. 1, негативно на усереднену чутливість впливає чутливість класифікації для груп хворих на мікросудинні (дифузні) розлади та спортсменів і здорових добровольців. Це зумовлено тим, що такі карти хворих на мікросудинні (дифузні) розлади діляться на чоловічі та жіночі, між якими можлива помилкова класифікація. Окрім того, карти спортсменів подібні до

карт здорових добровольців, тому між ними можлива помилкова класифікація. Найвищою є специфічність для груп хворих на гіпертрофію лівого шлуночка всіх рівнів і хворих на ішемічну хворобу серця найтяжчої форми, а також із пошкодженнями міокарда, що свідчить про те, що карти пацієнтів із розладами роботи серцево-судинної системи класифікуються досить добре. Сумарна точність класифікації запропонованого методу становить 0,95, що є гарним показником.

Висновки. Підсумовуючи результати, отримані в ході дослідження, можна зробити висновок, що запропонований метод класифікації, заснований на кореляційному аналізі, показує точність класифікації в 0,95. При цьому результати можуть бути покращені шляхом об'єднання подібних груп, зокрема хворих на мікросудинні (дифузні) розлади для чоловіків і жінок – в одну групу, а спортсменів і здорових добровольців – в іншу. Окрім того, результати класифікації можуть бути покращені за рахунок додаткової класифікації між подібними групами, якщо карта класифікована як така, що належить до однієї з них.

Запропонований метод класифікації може бути використаний лікарем для постановки діагнозу пацієнту, для якого були отримані магнітокардіографічні дані.

Список літератури:

1. Chaikovsky I., Primin N., Hugenholtz P. et al. Approaches and methods for the clinical interpretation of the magnetocardiogram. USIM, № 2, 2006, P. 33–43.
2. Chaikovsky I. et al. Magnetocardiography in clinical practice: algorithms and technologies for data analysis, Medical Science 3–4, June 2011, P. 21–38.
3. Koch H. Recent advances in magnetocardiography. Journal of Electrocardiology. Vol. 37, 2004, P. 117–122.
4. Leder U., Schrey F., Hauelsen J., et al. Reproducibility of HTS-SQUID magnetocardiography in an unshielded clinical environment. International Journal of Cardiology, 2001, P. 79–93.

5. Tsukada K. et al. Magnetocardiographic mapping characteristic for diagnosis of ischemic heart disease. *Computers in Cardiology*, Cambridge, MA, Sept. 2000, P. 505–508.
6. Geselowitz D., Magnetocardiography: an overview. *IEEE Transaction on Biomedical Engineering*, Vol. BME-26, Sept. 1979, P. 497–504.
7. Kobayashi K., Uchikawa Y., Nakai K., Yoshizawa M. Visualization of the Current-Density Distribution for MCG With WPW Syndrome Patients Using Independent Component Analysis. *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 40, No. 4, July 2004, P. 2970–2972.
8. Chaikovsky I., Katz M., Katz D. Principles of MCG maps classification. *International Journal of Bioelectromagnetism*. Vol. 5, N. 1, 2003, P. 100–101.
9. Hailer B., Chaikovsky I., Auth-Eisernitz S., Schäfer H., Steinberg F., Grönenemeyer D.H.W. Magnetocardiography in coronary artery disease with a new system in an unshielded setting. *Clinical Cardiology* 26, 2003, P. 465–471.
10. Udovychenko Y., Popov A., Chaikovsky I. Effective Surface Area of Current Density Distribution Maps. *Electronics and Communications*. 2014, Vol. 19, No5(82), P. 68–72.

МЕТОД КЛАССИФИКАЦИИ КАРТ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ТОКА В МИОКАРДЕ, ОСНОВАННЫЙ НА КОРРЕЛЯЦИОННОМ АНАЛИЗЕ

Магнитокардиография (МКГ) – это метод измерения магнитных полей, порожденных электрической активностью сердца, с использованием очень чувствительных устройств, таких, как сверхпроводящее квантовое интерференционное устройство. Одним из преимуществ МКГ является возможность формирования карт распределения магнитного поля над грудной клеткой, к которым могут быть применены математические методы анализа и классификации. В работе представлен метод классификации карт распределения плотности тока, полученных с помощью МКГ, основанный на корреляционном анализе. В экспериментальной части использованы 2142 карты распределения плотности тока 247 пациентов. С помощью предложенного метода удалось достичь точности классификации в 95% для случая распределения карт на 14 классов, соответствующих определенному состоянию сердечно-сосудистой системы.

Ключевые слова: магнитокардиография, карты распределения плотности тока, диагностика сердечно-сосудистых заболеваний, миокард, корреляционный анализ.

METHOD OF CURRENT DENSITY DISTRIBUTION MAPS CLASSIFICATION BASED ON CORRELATION ANALYSIS

Magnetocardiography (MCG) is a method of measuring magnetic fields generated by electrical activity of the heart using extremely sensitive devices such as superconducting quantum interference devices. One of the advantages of MCG is the possibility of forming magnetic field distribution maps over the chest, to which mathematical methods of analysis and classification can be applied. The paper describes the method of current density distribution maps classification, obtained using MCG, based on correlation analysis. In the experimental part, 2142 current density distribution maps of 247 patients were used. Using the proposed method, the accuracy of classification in 95% was achieved for the case of parting all maps to 14 classes that correspond to a certain state of the cardiovascular system.

Key words: magnetocardiography, current density distribution maps, diagnostics of cardiovascular diseases, myocardium, correlation analysis.

Відомості про авторів

Азаров С.І. – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник Інституту ядерних досліджень НАН України;

Азарян В.А. – кандидат технічних наук, доцент кафедри відкритих гірничих робіт ДВНЗ «Криворізький національний університет»;

Алтухова Т.В. – асистент кафедри електромеханіки і автоматики Індустріального інституту ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»;

Арсеньєва Н.О. – кандидат технічних наук, асистент кафедри проектування доріг, геодезії та землеустрою Харківського національного автомобільно-дорожнього університету;

Беглов К.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних технологій автоматизації Одеського національного політехнічного університету;

Бендерська О.В. – аспірант кафедри технології консервування Національного університету харчових технологій;

Бессараб О.С. – кандидат технічних наук, професор, завідувач кафедри технології консервування Національного університету харчових технологій;

Бліщ Р.О. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри харчових технологій Львівського торговельно-економічного університету;

Богданенко О.В. – старший викладач кафедри охорони праці та безпеки життєдіяльності Національного університету водного господарства та природокористування;

Ботштейн Б.Б. – доцент кафедри технології харчування Харківського державного університету харчування та торгівлі;

Бражнік І.Д. – аспірант кафедри безпеки життєдіяльності Національного університету «Одеська морська академія»;

Василишин В.Я. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інженерної та комп'ютерної графіки Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу;

Васюченко П.В. – кандидат педагогічних наук, доцент, доцент кафедри «Фізика, електротехніка та електроенергетики» Української інженерно-педагогічної академії;

Владов С.І. – кандидат технічних наук, завідувач навчально-методичної лабораторії, викладач кафедри енергозабезпечення і систем управління Кременчуцького льотного коледжу Національного авіаційного університету;

Гітуляр А.А. – аспірант кафедри металургії Запорізької державної інженерної академії;

Гринченко Н.Г. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технології м'яса Харківського державного університету харчування та торгівлі;

Жуков С.О. – доктор технічних наук, професор кафедри відкритих гірничих робіт ДВНЗ «Криворізький національний університет»;

Задунай О.С. – начальник центру Державного науково-дослідного інституту спеціального зв'язку та захисту інформації;

Золотарьова О.В. – кандидат педагогічних наук, доцент кафедри хімічної інженерії та екології Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля;

Канюк Г.І. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Теплоенергетики і енергозберігаючих технологій» Української інженерно-педагогічної академії;

Кирисов І.Г. – старший викладач кафедри «Фізика, електротехніка та електроенергетики» Української інженерно-педагогічної академії;

Кобилянський Б.Б. – кандидат технічних наук, доцент кафедри охорони праці та екологічної безпеки Навчально-наукового професійно-педагогічного інституту Української інженерно-педагогічної академії;

Колегасв М.О. – кандидат технічних наук, професор, завідувач кафедри безпеки життєдіяльності Національного університету «Одеська морська академія»;

Колосов О.С. – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, професор кафедри хімічного, полімерного та силікатного машинобудування інженерно-хімічного факультету Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

Котляров К.Г. – викладач циклової комісії фізико-математичних дисциплін та інформатики Кременчуцького льотного коледжу Національного авіаційного університету;

Косенко А.В. – аспірант, асистент кафедри підземної розробки родовищ корисних копалин ДВНЗ «Криворізький національний університет»;

Красулін А.С. – старший викладач кафедри транспортних технологій підприємств Приазовського державного технічного університету;

Крот О.П. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри безпеки життєдіяльності та інженерної екології Харківського національного університету будівництва та архітектури;

Курпе О.Г. – кандидат технічних наук, головний експерт МЕТІНВЕСТ ХОЛДІНГ;

Кухар В.В. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри обробки металів тиском ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет»;

Лінник Г.О. – старший викладач кафедри транспортних технологій підприємств Приазовського державного технічного університету;

Малахов О.В. – доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри суднових допоміжних механізмів Національного університету «Одеська морська академія»;

Мезеря А.Ю. – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Теплоенергетики і енергозберігаючих технологій» Української інженерно-педагогічної академії;

Мельников В.Є. – асистент кафедри «Теплоенергетики та енергозберігаючих технологій» Української інженерно-педагогічної академії

Мельниченко О.Л. – магістр Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

Михайленко І.В. – здобувач кафедри мікроелектроніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

Мнухін А.Г. – доктор технічних наук, професор кафедри прикладної екології та охорони праці Запорізької державної інженерної академії, Заслужений винахідник України, Академік Української Академії наук;

Мнухіна Н.О. – кандидат технічних наук, доцент кафедри прикладної екології та охорони праці Запорізької державної інженерної академії;

Нестерович С.О. – студент Національного технічного університету України «Одеський національний політехнічний університет»;

Орлов А.Т. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри мікроелектроніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

Панченко М.В. – магістр Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

Пивоваров П.П. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри технології харчування Харківського державного університету харчування та торгівлі;

Піргач В.Є. – магістрант 6-го курсу кафедри автоматизації теплоенергетичних процесів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

Попов А.О. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електронної інженерії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

Прибильський В.Л. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри біотехнології продуктів бродіння і виноробства Національного університету харчових технологій;

Сагайдак М.Є. – здобувач, викладач Львівського державного коледжу харчової і переробної промисловості;

Сердега Б.К. – доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач лабораторії модуляційно-поляризаційної спектроскопії Інституту фізики напівпровідників імені В. Є. Лашкарьова Національної академії наук України;

Сидоренко В.Л. – кандидат технічних наук, доцент, начальник кафедри Інституту державного управління у сфері цивільного захисту;

Скрипник С.О. – магістрант кафедри електромеханіки і автоматики Індустріального інституту ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»;

Слободянюк В.К. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри відкритих гірничих робіт Криворізького національного університету;

Слободянюк Р.В. – аспірант кафедри відкритих гірничих робіт Криворізького національного університету;

Степанець О.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації теплоенергетичних процесів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

Тарахтій О.С. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації теплоенергетичних процесів Одеського національного політехнічного університету;

Терещенко Т.О. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри промислової електроніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

Ткаченко В.В. – магістрант Одеського національного політехнічного університету;

Туровська Г.І. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри охорони праці та безпеки життєдіяльності Національного університету водного господарства та природокористування;

Удовиченко Є.С. – аспірант кафедри електронної інженерії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

Уліцька О.О. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних систем автоматизації Одеського національного політехнічного університету;

Фомін О.О. – кандидат технічних наук, доцент Одеського національного політехнічного університету;

Харабет О.М. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри Комп'ютерних систем управління Одеського національного політехнічного університету;

Хебда А.С. – викладач кафедри енергозабезпечення і систем управління Кременчуцького льотного коледжу Національного авіаційного університету

Чайковський І.А. – кандидат медичних наук, доктор медичних наук(ФРН), провідний науковий співробітник, керівник групи клінічної кібернетики Інституту кібернетики імені В.М. Глушкова Національної академії наук України;

Чаплун Д.О. – студент Харківського державного університету харчування та торгівлі;

Чернов М.Ю. – студент Одеського національного політехнічного університету;

Чернюк А.М. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри «Фізики, електротехніки та електроенергетики» Української інженерно-педагогічної академії;

Шмельов Ю.М. – кандидат технічних наук, заступник начальника коледжу з навчальної роботи, викладач кафедри енергозабезпечення і систем управління Кременчуцького льотного коледжу Національного авіаційного університету;

Юськів А.С. – студент Одеського національного політехнічного університету;

Ямненко Ю.С. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри промислової електроніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

Яременко В.С. – аспірант кафедри системного проектування 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) № 3 2018

Частина 2

Коректура • *Н. Пирог*

Комп'ютерна верстка • *С. Калабухова*

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. 23,95. Ум.-друк. арк. 23,48. Зам. № 0718/81

Підписано до друку 22.06.2018. 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.