

**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) № 4 2018**

**Частина 1**

**Київ  
2018**

## **Головний редактор:**

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

## **Члени редакційної колегії:**

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

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

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

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

**Лисенко Олександр Іванович** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри автоматизованого управління технологічними процесами Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;

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

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

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

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

**Рекомендовано до друку та поширення через мережу Internet  
Вченою радою Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського  
(протокол № 2 від 28.09.2018 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](http://www.tech.vernadskyjournals.in.ua)

## ЗМІСТ

### ПРИКЛАДНА ГЕОМЕТРИЯ, ІНЖЕНЕРНА ГРАФІКА ТА ЕРГОНОМІКА

**Данова К.В., Малишева В.В.**

АНАЛІЗ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ ОСІБ ІЗ ОБМЕЖЕННЯМИ ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ  
В КОНТЕКСТІ БЕЗПЕКИ ПРАЦІ.....1

**Колосова Е.П., Ванин В.В., Колосов А.Е.**

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ  
И ПРОЦЕССОВ ФОРМОВАНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ.  
2. Моделирование структуры дисперсно-наполненных реактопластов,  
а также проектирование технологии и оборудования для формования полимерных композитов.....7

### МАШИНОЗНАВСТВО

**Петров О.В., Козлов Л.Г., Трофимчук М.В.**

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ «ЛП-ПОШУКУ» ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ  
ПЕРЕЛИВНОГО КЛАПАНА ГІДРОРОЗПОДІЛЬНИКА ДЛЯ LS-ГІДРОПРИВОДІВ.....15

### ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

**Семенюк В.Ф., Лингур В.Н.**

ОБОСНОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ЗАЩИТЫ ГРУЗОПОДЪЕМНЫХ КРАНОВ  
МОСТОВОГО ТИПА ОТ СИСТЕМАТИЧЕСКИХ ПЕРЕГРУЗОК.....19

**Чайка Д.О.**

ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТЕЙ ТРАНСПОРТУВАННЯ БЕТОННОЇ СУМІШІ  
УНІВЕРСАЛЬНИМ ШЛАНГОВИМ БЕТОНОНАСОСОМ.....25

### КОРАБЛЕБУДУВАННЯ

**Бондаренко А.Г.**

ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ БАРЖ ІЗ ПЕРЕВЕЗЕННЯ ДОВГИХ РЕЙОК.....32

### ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

**Терещенко Т.О., Ямненко Ю.С., Клепач Л.Є., Лайкова Л.Г., Палій Д.М.**

ОГЛЯД ОСНОВНИХ МОДЕЛЕЙ ПРОГНОЗУВАННЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ В MICROGRID.....36

**Ямненко Ю.С., Демченко Ю.С.**

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ КОРЕКЦІЇ КОЕФІЦІЄНТА ПОТУЖНОСТІ .....42

### ПРИЛАДИ

**Кватернюк С.М.**

МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ КОНТРОЛЬ ПІГМЕНТНИХ ПАРАМЕТРІВ  
ФІТОПЛАНКТОНУ У ВОДНИХ СЕРЕДОВИЩАХ З ВИКОРИСТАННЯМ КВАДРОКОПТЕРА.....47

**Кравченко А.Ю., Терещенко М.Ф.**

ТЕРАПЕВТИЧНІ АПАРАТИ ДЛЯ ЛІКУВАННЯ АРТРОЗУ  
ГОМІЛКОВО-СТУПНЕВОГО СУГЛОБУ УЛЬТРАЗВУКОМ.....53

**Паньков С.Б., Терещенко М.Ф.**

ЗАЛЕЖНІСТЬ ПАРАМЕТРІВ ПРОНИКНЕННЯ ФАРМАКОЛОГІЧНИХ ПРЕПАРАТІВ  
У БІОЛОГІЧНУ ТКАНИНУ ВІД ДІЇ УЛЬТРАЗВУКОВИХ КОЛИВАНЬ  
РІЗНОЇ ІНТЕНСИВНОСТІ.....61

## РАДИОТЕХНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

**Євдокименко М.О., Шаповалова А.С.**

МЕТОД ОЦІНЮВАННЯ ВПЛИВУ АТАК НА ІНФОКОМУНІКАЦІЙНУ МЕРЕЖУ  
З УРАХУВАННЯМ НАЯВНИХ ВРАЗЛИВОСТЕЙ..... 67

**Лазебний В.С., Інь Ченлян**

ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПЕРЕДАВАННЯ АУДІОВІЗУАЛЬНОЇ ІНФОРМАЦІЇ  
ЗАСОБАМИ БЕЗПРОВОДОВОЇ МЕРЕЖІ 802.11n.....73

**Семенов А.О.**

ОПТИМІЗАЦІЯ ТРАНЗИСТОРНОГО ГЕНЕРАТОРА КИЯШКА-ПІКОВСЬКОГО-РАБІНОВИЧА  
ЗА ІНФОРМАЦІЙНИМИ ПАРАМЕТРАМИ ХАОТИЧНИХ СИГНАЛІВ.....83

## ІНФОРМАТИКА, ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ

**Андрущенко В.Б.**

ПІДХОДИ ДО ВИЗНАЧЕННЯ КРИТЕРІЇВ  
ДЛЯ АНАЛІЗУ ONLINE РЕСУРСІВ НАУКОВОЇ ІНФОРМАЦІЇ..... 88

**Бабаков Р.М.**

СИНТЕЗ ЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ МИКРОПРОГРАММНОГО АВТОМАТА  
С ОПЕРАЦИОННЫМ АВТОМАТОМ ПЕРЕХОДОВ .....96

**Біряк В.В.**

РОЗРАХУНОК ДИНАМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТРУБОПРОВОДУ  
ВІД ПНТ-4 ДО ПНТ-3 ПО ВИТРАТІ КОНДЕНСАТУ В ГРУПІ ПІДГРІВАЧІВ НИЗЬКОГО ТИСКУ  
ЕНЕРГОБЛОКУ 1000 МВт ЗАПОРІЗЬКОЇ АЕС..... 100

**Бойко О.В., Пелих С.В.**

РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ РЕЖИМОМ  
НАВАНТАЖЕННЯ РЕАКТОРНОЇ УСТАНОВКИ З ВВЕР-1000 З УРАХУВАННЯМ ПАРАМЕТРА  
ДЕФОРМАЦІЙНОГО ПОШКОДЖЕННЯ ОБОЛОНОК ТВЕЛІВ..... 105

**Бородкіна І.Л., Бородкін Г.О.**

МЕТОДИ Й ТЕХНОЛОГІЇ ЗАХИСТУ ІНФОРМАЦІЇ  
В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОННОГО ДОКУМЕНТООБИГУ.....110

**Вовк І.В.**

АВТОМАТИЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИГОТОВЛЕННЯ  
КАВІТАЦІЙНОГО ВОДНО-ВУГІЛЬНОГО ПАЛИВА.....115

**Вяткин С.И., Павлов С.В., Романюк С.А.**

РЕЙКАСТИНГ ОБЪЕМНЫХ ДАННЫХ И ФУНКЦИОНАЛЬНО ЗАДАННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ  
ДЛЯ МЕДИЦИНСКИХ ПРИЛОЖЕНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ГРАФИЧЕСКИХ УСКОРИТЕЛЕЙ.....120

**Дмитришин С.С., Давидов В.О.**

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ГОРІННЯ ВУГЛЕВОДНИХ ГАЗІВ У ПАРОГЕНЕРУЮЧИХ  
УСТАНОВКАХ ЗА РАХУНОК ЗМІНИ ВІДНОШЕННЯ ПАЛЬНЕ/ПОВІТРЯ.....126

**Дуба І.Е.**

СУЧАСНА ЦИФРОВА БАГАТОЗВ'ЯЗНА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ОСНОВНИМ КОНТУРОМ –  
ПОЛОЖЕННЯ ПЛАЗМОВОГО ШНУРА – УСТАНОВКИ ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗУ ТОКАМАК.....132

**Жученко О.А., Коротинський А.П.**

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ОХОЛОДЖЕННЯ У БАГАТОКАМЕРНИХ  
ПЕЧАХ ВИПАЛЮВАННЯ ВУГЛЕЦЕВИХ ВИРОБІВ.....138

**Киселёва Н.И., Погребной Я.С., Беглов К.В.**

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРОГРАММ РЕГУЛИРОВАНИЯ МОЩНОСТИ  
ДЛЯ СУТОЧНОГО МАНЕВРИРОВАНИЯ ЭНЕРГОБЛОКОМ АЭС С РЕАКТОРОМ ВВЭР-1000.....147

<b>Кисельов Г.Д., Мироненко С.С.</b> ІНФРАСТРУКТУРА ПЛАТФОРМИ ЕЛЕКТРОННОЇ ПІДТРИМКИ НАВЧАЛЬНОГО ПРОЦЕСУ.....	153
<b>Комаров М.Ю., Гончар С.Ф.</b> АНАЛІЗ І ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАГРОЗ ДЛЯ ЗАХИЩЕНОГО ВУЗЛА ІНТЕРНЕТ ДОСТУПУ.....	165
<b>Конушбаєва Т.В.</b> АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСОМ ЗНЕВОДНЕННЯ ВОЛОГОЇ ПАРИ ДЛЯ ЕНЕРГОБЛОКУ ВВЕР-1000.....	169
<b>Кравченко С.М., Марчук Г.В.</b> ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДОЛОГІЇ DEVOPS В УПРАВЛІННІ ІТ ПРОЕКТАМИ.....	175
<b>Мацуй А.М., Кондратець В.О.</b> АНАЛІЗ РОБОТИ КУЛЬОВОГО МЛИНА ПЕРШОЇ СТАДІЇ ПОДРІБНЕННЯ РУДИ ЯК ОБ'ЄКТА ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ.....	180
<b>Мещеряков Д.В.</b> АНАЛІЗ ВЛИЯНИЯ ЗАПАЗДЫВАНИЯ НА УСТОЙЧИВОСТЬ СИСТЕМЫ С БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ.....	189
<b>Пасічна М.В.</b> ОПТИМІЗАЦІЙНЕ ТА ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СТРУКТУРИ ЕЛЕКТРОГЕНЕРУЮЧИХ ПОТУЖНОСТЕЙ ЕНЕРГЕТИЧНИХ КОМПАНІЙ .....	193
<b>Пелещин А.М., Вус В.А., Марковець О.В.</b> ПОБУДОВА ФОРМАЛЬНОЇ МОДЕЛІ ВІРТУАЛЬНИХ СПІЛЬНОТ ЯК СЕРЕДОВИЩА СОЦІОКОМУНІКАТИВНОГО ПРОТИБОРСТВА.....	201
<b>Петросян А.А., Давидов В.О.</b> АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ ЖИВЛЕННЯ ПАРОВОГО КОТЛА ГМ-50.....	208
<b>Саць Е.Ф., Саць Т.А., Максимов М.В.</b> СОПОСТАВЛЕНИЕ ПОСТОЯННЫХ РЕГУЛИРОВАНИЯ В РЕГУЛЯТОРЕ МОЩНОСТИ РЕАКТОРА ПРИ ПРОГРАММЕ РЕГУЛИРОВАНИЯ С ПОСТОЯННОЙ СРЕДНЕЙ ТЕМПЕРАТУРОЙ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В ПЕРВОМ КОНТУРЕ И ПОСТОЯННОЙ ТЕМПЕРАТУРОЙ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ НА ВХОДЕ В АКЗ РЕАКТОРА ПО АКСИАЛЬНОМУ ОФСЕТУ.....	215
<b>Саць Т.А., Саць Е.Ф.</b> СОПОСТАВЛЕНИЕ ПОСТОЯННЫХ РЕГУЛИРОВАНИЯ В РЕГУЛЯТОРЕ МОЩНОСТИ РЕАКТОРА ПРИ ПРОГРАММЕ РЕГУЛИРОВАНИЯ С ПОСТОЯННЫМ ДАВЛЕНИЯ ВО ВТОРОМ КОНТУРЕ И ПОСТОЯННОЙ ТЕМПЕРАТУРОЙ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ НА ВХОДЕ В АКЗ РЕАКТОРА ПО АКСИАЛЬНОМУ ОФСЕТУ.....	221

# CONTENTS

## APPLIED GEOMETRY, ENGINEERING GRAPHICS AND ERGONOMIC

**Danova K.V., Malysheva V.V.**

ANALYSIS OF THE WORKING CAPACITY OF PERSONS  
WITH DISABILITY IN THE CONTEXT OF OCCUPATIONAL SAFETY .....1

**Kolosova E.P., Vanin V. V., Kolosov A.E.**

SOME ASPECTS OF GEOMETRICAL MODELING OF TECHNICAL OBJECTS  
AND PROCESSES FOR FORMING POLYMER COMPOSITES.  
2. Modeling of the structure of disperse-filled thermosets, as well as the design of technology  
and equipment for molding polymer composites .....7

## MACHINE SCIENCE

**Petrov O.V., Kozlov L.G., Trofymchuk M.V.**

USING THE «LP-SEARCH» METHOD FOR OPTIMIZING PARAMETERS  
OF THE RELIEF VALVE OF THE DIRECTIONAL CONTROL VALVE  
FOR THE LOAD-SENSING HYDRAULIC DRIVES.....15

## INDUSTRIAL ENGINEERING

**Semenyuk V.F., Lingur V.N.**

SUBSTANTIATION OF POSSIBILITIES TO PROTECT THE BRIDGE TYPE  
HOISTING CRANES AGAINST SYSTEMATIC OVERLOADS.....19

**Chayka D.O.**

INVESTIGATION OF THE POSSIBILITIES OF TRANSPORTATION  
OF CONCRETE MIXTURE BY UNIVERSAL HOSE CONCRETE PUMP .....25

## SHIPBUILDING

**Bondarenko A.H.**

DETERMINATION OF BARJES PARAMETERS FOR THE TRANSPORT OF LONG RAILS .....32

## ELECTRICAL ENGINEERING

**Tereshchenko T.O., Yamnenko Y.S., Klepach L.E., Laikova L.G., Palii D.M.**

REVIEW OF MAIN MODELS FOR FORECASTING POWER CONSUMPTION IN MICROGRID ....36

**Yamnenko Y.S., Demchenko Y.S.**

EFFICIENCY IMPROVEMENT OF POWER FACTOR CORRECTION .....42

## EQUIPMENT

**Kvaterniuk S.M.**

MULTISPECTRAL ECOLOGICAL CONTROL OF PIGMENT PARAMETERS  
OF PHYTOPLANKTON IN AQUEOUS MEDIA USING QUADROCOPTER .....47

**Kravchenko A.Yu., Tereshchenko M.F.**

THERAPEUTIC DEVICES FOR THE TREATMENT OF ARTHROSIS  
AN ANKLE JOINT BY ULTRASOUND .....53

**Pankov S.B., Tereshchenko M.F.**

DEPENDENCE OF PARAMETERS PENETRATION OF PHARMACOLOGICAL  
PREPARATIONS IN THE BIOLOGICAL TISSUE FROM ACTION  
OF ULTRASOUND OSCILLATIONS OF VARIOUS INTENSITY .....61

## **RADIO ENGINEERING AND TELECOMMUNICATIONS**

**Yevdokymenko M.A, Shapovalova A.S.**

ASSESSMENT METHOD OF THE ATTACKS INFLUENCE  
ON THE INFOCOMUNICATION NETWORK ACCORDING TO EXISTING VARIABILITY.....67

**Lazebnyi V.S., YinCh.**

EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF TRANSMISSION  
OF AUDIOVISUAL INFORMATION BY MEANS OF 802.11N WIRELESS NETWORK.....73

**Semenov A.O.**

KIYASHKO-PIKOVSKY-RABINOVICH TRANSISTOR OSCILLATOR OPTIMIZATION  
BY INFORMATION PARAMETERS OF CHAOTIC SIGNALS.....83

## **INFORMATICS, COMPUTER ENGINEERING AND AUTOMATION**

**Andrushchenko V.B.**

APPROACHES TO DEFINE THE CRITERIA FOR RESEARCH  
INFORMATION ONLINE RESOURCES ANALYSIS.....88

**Babakov R.M.**

SYNTHESIS OF THE LOGICAL CIRCUIT OF THE MICROPROGRAMMABLE  
FINITE-STATE MACHINE WITH DATAPATH OF TRANSITIONS.....96

**Biryak V.V.**

CALCULATION OF DYNAMIC PROPERTIES OF PIPELINE FROM LPH-4  
TO LPH-3 BY CONSUMPTION COSTS IN A GROUP OF LOW PRESSURE  
OF THE 1000 MW ZAPORIZHIA NUCLEAR POWER PLANT .....100

**Boyko O.V., Pelykh S.N.**

DEVELOPMENT AND INVESTIGATION OF AUTOMATED SYSTEM OF MANAGEMENT  
OF LOADING MODE OF REACTOR INSTALLATION WITH VVER-1000 WITH TAKING  
OF THE PARAMETER OF DEFORMATION DAMAGE OF ENVELOPES  
OF HEAT-CONDUCTING ELEMENTS.....105

**Borodkina I.L., Borodkin H.O.**

METHODS AND TECHNOLOGIES OF INFORMATION  
SECURITY IN ELECTRONIC MANAGEMENT SYSTEMS .....110

**Vovk I.V.**

AUTOMATION OF THE TECHNOLOGICAL PROCESS FOR MANUFACTURE  
OF CALCULATED WATER-COAL FUEL.....115

**Vyatkin S.I., Pavlov S.V., Romanyuk S.O.**

RAY CASTING OF VOLUME DATA AND FUNCTIONALLY SURFACED SURFACES  
FOR MEDICAL APPLICATIONS WITH APPLICATION OF GRAPHIC ACCELERATORS.....120

**Dmytryshyn S.S., Davidov V.O.**

ENHANCEMENT OF THE EFFICIENCY OF BURNING CARBOHYDRATED GASES IN  
POROGENERATOR INSTALLATIONS AT THE RATES OF REFRACTION OF THE FUEL/AIR.....126

**Duba I.E.**

MODERN DIGITAL MULTIPLAYER CONTROL SYSTEM BY MAIN CONTROL –  
POSITION OF PLASMA SHEET – INSTALLATION OF THERMOBILE SYNTHESIS TOKAMAK....132

**Zhuchenko O.A., Korotynskiy A.P.**

INVESTIGATION OF THE COOLING PROCESS IN MULTI CHAMBER FURNACE  
OF CARBON PRODUCTS BAKING .....138

<b>Kiseliova N.I., Pogrebnoi Ya.S., Beglov K.V.</b> INVESTIGATION OF REGULATION PROGRAMS, FOR DAILY MANEUVERING OF THE NPP UNIT WITH THE WWER-1000 REACTOR .....	147
<b>Kiselev G.D., Myronenko S.S.</b> THE INFRASTRUCTURE OF THE E-LEARNING PLATFORM FOR THE LEARNING PROCESS ....	153
<b>Komarov M.Yu., Honchar S.F.</b> ANALYSIS AND RESEARCHES OF THREATS FOR A PROTECTED INTERNET ACCESS NODE...	165
<b>Konushbaeva T.V.</b> AUTOMATED SYSTEM OF THE MANAGEMENT OF THE PROCESS OF THE REVERSING OF HYDROGEN POWDER FOR VVER-1000 VEGETABLES.....	169
<b>Kravchenko S.M., Marchuk H.V.</b> USE OF DEVOPS METHODOLOGY IN PROJECT MANAGEMENT .....	175
<b>Matsui A.N., Kondratets V.A.</b> ANALYSIS OF OPERATION OF THE BALL MILL OF THE FIRST STAGE OF MILLING ORE AS A OBJECT OF OPTIMUM CONTROL.....	180
<b>Meshcheriakov D.V.</b> ANALYSIS OF LAGING INFLUENCE ON THE SYSTEM SUSTAINABILITY WITH BIOLOGICAL FEEDBACK.....	189
<b>Pasichna M.V.</b> OPTIMIZATION AND SIMULATION MODELING OF THE STRUCTURE OF ELECTRICITY GENERATION CAPACITIES OF ENERGY COMPANIES.....	193
<b>Peleshchyshyn A.M., Vus V.A., Markovets O.V.</b> CONSTRUCTION OF THE FORMAL MODEL OF THE VIRTUAL COMMUNITY AS AN ENVIRONMENT OF SOCIO-COMUNICATIVE DISPUTE .....	201
<b>Petrosyan A.A., Davidov V.O.</b> SYSTEM OF AUTOMATIC CONTROL OF TECHNOLOGICAL PROCESSES OF POWER STEAM BOILER GM-50.....	208
<b>Sats E.F., Sats T.O., Maksimov M.V.</b> COMPARISON OF PERMANENT REGULATION IN POWER CONTROL OF THE REACTOR, WHEN THE CONTROL PROGRAM WITH A CONSTANT AVERAGE COOLANT TEMPERATURE IN PRIMARY CIRCUIT AND CONSTANT TEMPERATURE OF THE COOLANT AT THE ENTRANCE TO THE ANTICORROSION REACTOR FOR AXIAL OFFSET .....	215
<b>Sats T.O., Sats E.F.</b> COMPARISON OF PERMANENT REGULATION IN POWER CONTROL OF THE REACTOR, WHEN THE CONTROL PROGRAM WITH A CONSTANT PRESSURE IN THE SECOND CIRCUIT AND A CONSTANT COOLANT TEMPERATURE AT THE ENTRANCE TO THE ANTICORROSION REACTOR FOR AXIAL OFFSET.....	221



# ПРИКЛАДНА ГЕОМЕТРІЯ, ІНЖЕНЕРНА ГРАФІКА ТА ЕРГОНОМІКА

УДК 614.8:331.45:331.421:331.582.2

**Данова К.В.**

Харківський національний університет міського господарства  
імені О.М. Бекетова

**Малишева В.В.**

Харківський національний університет міського господарства  
імені О.М. Бекетова

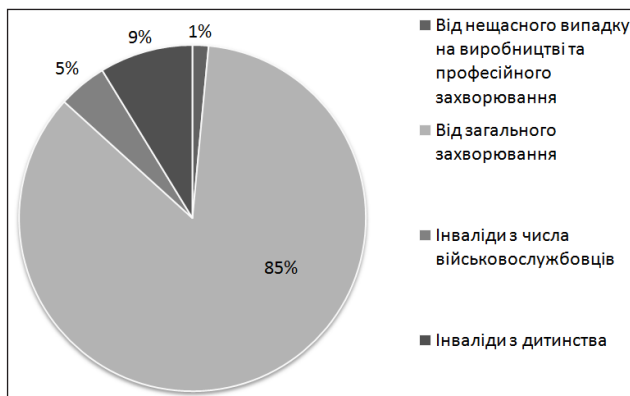
## АНАЛІЗ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ ОСІБ ІЗ ОБМЕЖЕННЯМИ ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ В КОНТЕКСТІ БЕЗПЕКИ ПРАЦІ

*Стаття присвячена питанню визначення рівня працездатності працівника з інвалідністю з метою оптимізації процесу підбору робочого місця та забезпечення безпеки праці. Задля досягнення мети проаналізовано поняття працездатності в аспекті обмежених можливостей осіб із інвалідністю й побудовано діаграму відповідності можливостей працівника з інвалідністю вимогам робочого місця та технологічного процесу.*

**Ключові слова:** особа з обмеженими можливостями, безпека, робоче місце, працездатність.

**Постановка проблеми.** Професійна та повсякденна діяльність людини пов'язана з небезпекою ушкодження здоров'я внаслідок впливу небезпечних і шкідливих виробничих факторів, особистої необережності й інших причин. В окремих випадках існує вірогідність отримання травми в дородовому та родовому періодах, що також може призвести до стійких змін у стані здоров'я й інвалідності.

Основною причиною первинної інвалідності (рис. 1) є загальне захворювання (у середньому 85% випадків). Далі в міру зниження: особи з інвалідністю з дитинства – 9%; з числа військовослужбовців – 5%; унаслідок нещасного випадку на виробництві та професійного захворювання – 1%.



**Рис. 1.** Розподіл причин інвалідності, що виявлено вперше [1]

Вплив уражаючих факторів, унаслідок яких людина отримує стійке ушкодження здоров'я, призводить до обмеження її життєдіяльності й отримання інвалідності I, II чи III групи.

Міжнародні конвенції з прав людини зокрема [2] та законодавство України [3–4] захищають право осіб з інвалідністю на працю й вимагають від роботодавця впроваджувати заходи щодо адаптації виробничого середовища під можливості працівника з урахуванням стану його здоров'я. Так, стаття 12 Закону України «Про охорону праці» [4] зобов'язує підприємства, де працюють особи з інвалідністю, створювати для них безпечні умови праці з урахуванням рекомендацій медико-соціальної експертної комісії (далі – МСЕК), що містяться в індивідуальній програмі реабілітації (ІПР), а також уживати всіх необхідних заходів безпеки праці, які відповідають особливостям цієї категорії працівників.

Україна має наднизький, порівняно з іншими європейськими країнами, відсоток працевлаштованих осіб із інвалідністю (близько 0,5% від загальної чисельності осіб із обмеженими можливостями [5]). Значною мірою це відбувається через складність підбору робочого місця під можливості працівника та подальшої його адаптації з метою забезпечення безпеки праці. Це зумов-

лює актуальність і необхідність вирішення цього питання.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Від середини минулого століття проблема підвищення ефективності працевлаштування осіб із інвалідністю з метою забезпечення рівності їхніх прав є одним із пріоритетних напрямів соціальної політики всіх економічно розвинених країн світу. Протягом цього часу кожна країна, враховуючи особливості свого законодавства, прагне знайти найбільш ефективну схему забезпечення трудової зайнятості осіб із інвалідністю, оскільки така активність сприяє самореалізації людини, підвищує самооцінку, допомагає відчувати себе частиною суспільства, що позитивно впливає на психічне здоров'я, а отже, допомагає відновленню життєвих функцій [6].

Світова економічна спільнота оцінює втрати від виключення осіб із інвалідністю з трудового процесу як дуже значні: згідно з оцінкою Department for Work and Pensions (Великобританія), економічний потенціал осіб із інвалідністю, котрих у країні близько 10 млн. осіб, а у світі понад 1 млрд. осіб, становить більше ніж 200 млрд. фунтів [7]. Найближчими роками у Великобританії очікується зростання кількості осіб із інвалідністю на 25%, що пов'язано з прогнозованим збільшенням тривалості життя населення в середньому на 7 років, а також підвищенням кількості серцево-судинних захворювань [8].

З огляду на це, закордонні науковці вже тривалий час працюють над пошуком ефективної моделі включення осіб із інвалідністю в трудовий процес і забезпечення їхньої безпеки на робочих місцях.

Дослідженнями встановлено, що більшість осіб із особливими потребами здатні виконувати свої професійні обов'язки [9]. Незважаючи на кваліфікацію, досвід і згоду працювати за меншу зарплатню (порівняно з працівником без інвалідності), ці люди, внаслідок упередженого ставлення роботодавців, мають значні труднощі під час працевлаштування. У більшості випадків роботодавці розцінюють працівника з інвалідністю як значну перепону на шляху до ефективної роботи окремого відділу чи компанії в цілому. Це пов'язано з нижчим рівнем працездатності, необхідністю додаткових капіталовкладень на адаптацію робочого місця та посиленням контролю за безпекою праці осіб із інвалідністю. Цим пояснюється той факт, що такі працівники мають більше шансів знайти роботу в неприбутковій організації [10].

Однак, незалежно від статусу організації та виду господарчої діяльності, працевлаштування працівників із інвалідністю, вибір робочого місця та заходи з охорони праці мають розроблятися з урахуванням принципів інженерної психології й ергономіки.

Установлено [11], що на ефективність працевлаштування осіб із інвалідністю суттєвий вплив чинить нозологічна група основного захворювання. У Швеції проаналізовано ефективність працевлаштування понад 4000 осіб із інвалідністю, яких розподілено за групами захворювань: 1) комунікативно-слухові порушення; 2) комунікативно-мовно-читальні порушення; 3) комунікативно-зорові порушення; 4) психічна непрацездатність; 5) медична непрацездатність; 6) фізична непрацездатність.

Проведений регресійний аналіз показав, що найбільш ефективним є працевлаштування осіб із вадами слуху (перша група). Найменш ефективним виявилось працевлаштування осіб із психічними захворюваннями (четверта група). Деякі дослідники пов'язують це з низьким рівнем освіти, яку мають представники цієї групи, що стає перепорою для ефективного працевлаштування [11].

Зайнятість осіб із інвалідністю в Польщі оцінюється в середньому близько 23% [12]. Із них приблизно половина осіб працює на спеціалізованих підприємствах, де для працівників із інвалідністю створено спеціальні робочі місця з підвищеним рівнем контролю. Це підтверджує важливість використання принципів інженерної психології та ергономіки задля оптимізації процесу підбору робочого місця під індивідуальні особливості особи з обмеженими можливостями й забезпечення безпеки праці та високого рівня працездатності в умовах підприємства.

**Постановка завдання.** Розробка дієвого механізму підбору робочого місця під обмежені можливості працівника й подальше забезпечення безпеки праці базується на оцінюванні рівня його працездатності. МСЕК, якій відведено провідну роль у визначенні ступеня втрати професійної придатності й реабілітаційного потенціалу особи з інвалідністю, встановлює ступінь обмеження життєдіяльності людини та визначає види професій і спеціальностей, доступні за станом здоров'я. Однак при цьому не надається конкретних рекомендацій щодо адаптації робочого місця з урахуванням наявних обмежень життєдіяльності й працездатності. Тому методика оцінювання структури працездатності працівника з інвалідністю та визначення її відповідності вимогам робочого

місця й технологічного процесу є дієвим механізмом у прийнятті управлінських рішень з охорони праці в умовах підприємства.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** У процесі виконання професійних обов'язків працівник із інвалідністю взаємодіє з певними предметами, технічними пристроями, що формують робоче місце, а також виробничим середовищем, яке характеризується параметрами мікроклімату, шуму, освітлення тощо. У сукупності ці компоненти формують систему «Працівник із інвалідністю – робоче місце – навколишнє середовище» (далі – ПРН), яка належить до робочої системи, оскільки спрямована на виконання певних виробничих завдань [13]. Завдання аналізу системи ПРН зводиться до оптимізації процесу підбору робочого місця з урахуванням обмежень працівника з інвалідністю задля мінімізації ризику травмування, загострення хронічних захворювань і підвищення ефективності його праці. Результати аналізу сприяють підвищенню надійності працівника як виконавця професійних завдань і безпеці на робочих місцях.

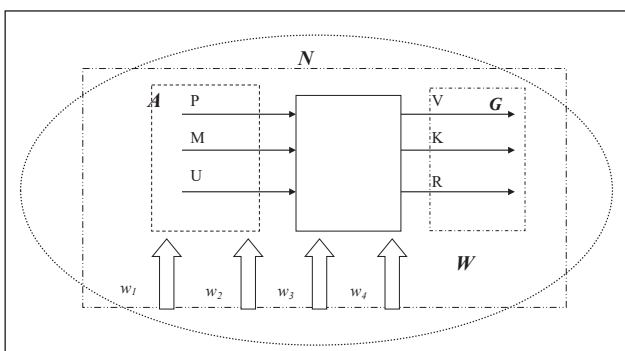
У загальному вигляді система ПРН характеризується кортежем

$$S = \{A, W, N\}, \quad (1)$$

де  $A$  – множина характеристик, що визначають здатність до виконання виробничої діяльності працівника з інвалідністю;

$W$  – множина характеристик умов праці, яка поєднує фізичні, хімічні, біологічні та психофізіологічні фактори виробничого середовища і трудового процесу на робочому місці,  $w_i \in W$ ;

$N$  – множина характеристик, що обумовлюють стан навколишнього середовища, безпосередньо впливають на безпеку перебування працівника з інвалідністю на території підприємства,  $n_i \in N$ .



**Рис. 2. Система «працівник із інвалідністю – робоче місце – навколишнє середовище» в загальному вигляді**

Тобто система ПРН представлена у вигляді «чорного ящика», вхідними параметрами якого є характеристики працездатності, а вихідними –

показники безпеки та ефективності трудової діяльності працівника з інвалідністю  $G$  в умовах робочого місця й навколишнього середовища (рис. 2). Величина продуктивності та якості виконання трудових завдань при допустимому рівні професійного ризику дає змогу оцінити рівень успішності працівника з інвалідністю на тому чи іншому робочому місці з погляду роботодавця.

У дослідженні системи ПРН характеристики працездатності є важливими під час вирішення проблеми оптимізації процесу вибору робочого місця та подальшого забезпечення безпеки праці. Державний стандарт України [14] характеризує працездатність як потенційну здатність людини протягом заданого часу та з певною ефективністю виконувати максимально можливий обсяг роботи. Тобто це поняття містить суто трудовий аспект і не розкриває інших аспектів трудового процесу. Тому для реалізації завдань у рамках дослідження доцільно використовувати визначення працездатності, яке наведено в Положенні про експертизу тимчасової непрацездатності [15], згідно з яким працездатність – це сукупність фізичних, розумових та емоційних можливостей, яка дає змогу працівникові виконувати роботу визначеного обсягу, характеру і якості. Схоже визначення терміна «працездатність» надано в Гігієнічній класифікації праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу [16].

За цими визначеннями [15; 16] працездатність виступає як інтегральний показник здатності людини як суб'єкта з певними фізичними, розумовими й емоційними можливостями здійснювати професійну діяльність, що характеризується визначеним обсягом, специфікою і якістю виконання.

Поняття працездатності необхідно диференціювати з поняттям працеспроможності, під яким розуміється стан людини, обумовлений можливістю фізіологічних і психічних функцій організму, що характеризують його здатність виконувати конкретну кількість роботи заданої якості за необхідний інтервал часу [16].

Виходячи з вищевказаного визначення, працездатність людини в загальному вигляді запишемо так:

$$A = \{P, M, U\}, \quad (2)$$

де  $P$  – фізичні можливості людини здійснювати професійну діяльність;

$M$  – розумові можливості людини, які необхідні для виконання посадових обов'язків;

$U$  – емоційні можливості людини, які обумовлюють придатність її до виконання робочих функцій.

Матриця обмежень працездатності працівника з особливими потребами

Категорії обмеження життєдіяльності, $u_p$	Ступінь вираженості критерію обмеження життєдіяльності, $k_j$		
	I ступінь – помірно виражений, $k_1$	II ступінь – виражений, $k_2$	III ступінь – значно виражений, $k_3$
Самообслуговування, $u_1$	$u_1 k_1$	$u_1 k_2$	$u_1 k_3$
Самостійне пересування, $u_2$	$u_2 k_1$	$u_2 k_2$	$u_2 k_3$
Орієнтація, $u_3$	$u_3 k_1$	$u_3 k_2$	$u_3 k_3$
Спілкування, $u_4$	$u_4 k_1$	$u_4 k_2$	$u_4 k_3$
Контроль своєї поведінки, $u_5$	$u_5 k_1$	$u_5 k_2$	$u_5 k_3$
Здатність до навчання, $u_6$	$u_6 k_1$	$u_6 k_2$	$u_6 k_3$
Здатність до трудової діяльності, $u_7$	$u_7 k_1$	$u_7 k_2$	$u_7 k_3$

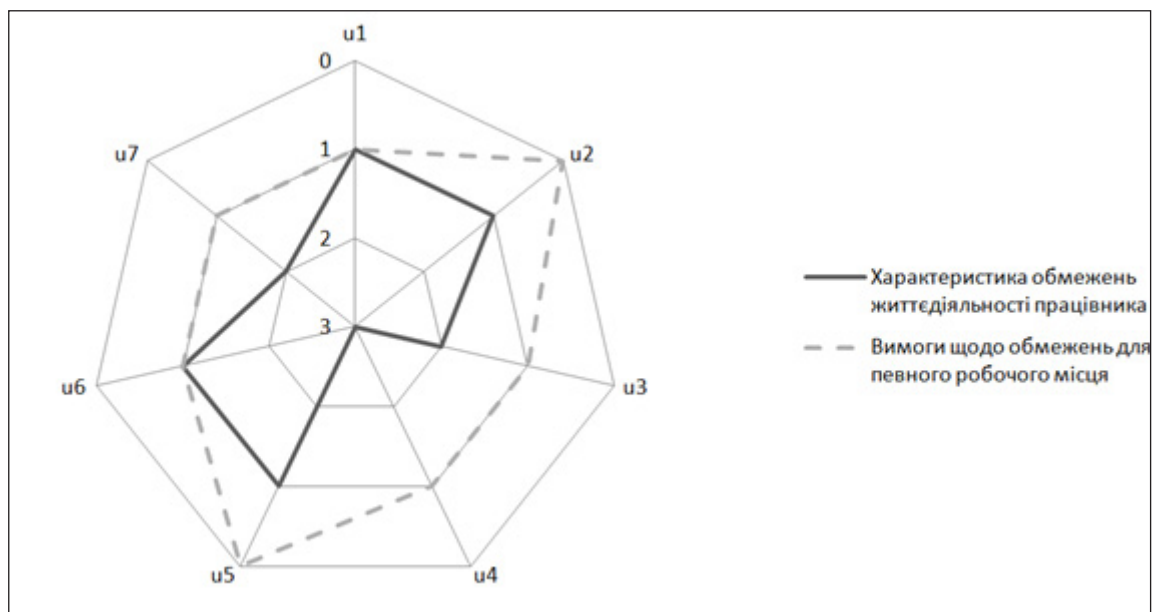


Рис. 3. Діаграма відповідності можливостей працівника з інвалідністю вимогам робочого місця й технологічного процесу

У працівника з інвалідністю внаслідок стійких вад у стані здоров'я наявні певні обмеження можливостей здійснювати професійну діяльність. Категорії обмеження життєдіяльності  $u_p$  (таблиця 1), за якими МСЕК установлює ступінь втрати здоров'я та групу інвалідності [17], зі ступенями їх вираженості,  $k_j$ , представлені матрицею  $\|E_{pj}\|$ :

$$\|E_{pj}\| = \{u_p, k_j\}. \quad (3)$$

З іншого боку,

$$E_{pj} = A - A_d, \quad (4)$$

де  $A_d$  – працездатність працівника з інвалідністю.

З урахуванням цього, обмеження життєдіяльності, які впливають на працездатність, запишемо так:

$$E_{pj} = \{\Delta P, \Delta M, \Delta U\}. \quad (5)$$

Отже, обмеження життєдіяльності людини характеризується сукупністю відхилень фізичних, розумових та емоційних можливостей, які мають бути частково чи повністю компенсовані шляхом упровадження адаптаційних механізмів з метою забезпечення максимального можливого за цих умов рівня працездатності й безпеки.

З іншого боку, дослідження особливостей робочого місця та технологічного процесу з метою визначення необхідних якостей, якими має володіти працівник задля забезпечення своєї безпеки й безпеки інших осіб, є необхідною умовою оптимізації цього процесу.

На рис. 3 представлено діаграму, яка дає змогу наочно зобразити відповідність можливостей працівника з інвалідністю вимогам, що висуваються до нього особливостями робочого місця й технологічного процесу. Ці вимоги фор-

нуються на основі результатів атестації умов праці, експертної оцінки та аналізу виробничого травматизму й професійних захворювань на робочих місцях.

Використання діаграм відповідності надає роботодавцеві інформаційну базу щодо прийняття управлінських рішень стосовно підвищення рівня безпеки праці на робочому місці з метою зниження ризику травматизму чи погіршення перебігу основного захворювання в працівника з інвалідністю.

**Висновки.** Ефективна та безпечна професійна діяльність працівника з інвалідністю в умовах виробництва є запорукою успішної реалізації реабілітаційних заходів, спрямованих на соціалізацію в суспільстві осіб із певними обмеженнями

життєдіяльності. Важливим кроком на шляху до вирішення цього питання є аналіз працездатності працівника й установлення ступеня його відповідності вимогам робочого місця. У випадку оптимального підбору робочого місця під можливості працівника з інвалідністю подальша адаптація трудового процесу допомагає підвищити рівень працездатності, зменшити кількість помилок і втомлюваність, що позитивно відіб'ється на ефективності й безпеці його праці. Розробка методики оптимізації вибору робочого місця з урахуванням його особливостей і наявних обмежень життєдіяльності працівника з інвалідністю дає змогу виробити ефективні управлінські рішення та сприятиме зростанню використання професійного потенціалу осіб із інвалідністю.

#### Список літератури:

1. Соціальний захист населення України. Статистичні збірники за 2014–2016 рр. URL: <http://www.ukrstat.gov.ua/> (дата звернення: 15.07.2018).
2. Конвенція про професійну реабілітацію та зайнятість інвалідів. Київ: ВПУ, 2003. URL: [http://zakon1.rada.gov.ua/laws/show/993\\_065](http://zakon1.rada.gov.ua/laws/show/993_065) (дата звернення: 16.07.2018).
3. Про основи соціальної захищеності осіб з інвалідністю в Україні: Закон України. Київ: ВПУ, 1991. URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/875-12> (дата звернення: 16.07.2018).
4. Про охорону праці: Закон України. Київ: ВПУ, 1992. URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/2694-12> (дата звернення: 16.07.2018).
5. Данова К.В., Хворост М.В. Роль професійно-трудової реабілітації осіб із інвалідністю у контексті безпеки праці. Комунальне господарство міст. Вип. 142. Харків: ХНУМГ, 2018. С. 119–124.
6. Curnock E., Leyland A.H., Popham F. The impact on health of employment and welfare transitions for those receiving out-of-work disability benefits in the UK. *Social Science & Medicine*. 2016. V. 162. P. 1–10.
7. Hiring good people is good business / Disability Confident – Committed. Level 1. URL: World Wide Web: [https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/618420/disability-confident-employer-pack-level-1.pdf](https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/618420/disability-confident-employer-pack-level-1.pdf) (viewed on July 13, 2018).
8. Gilmour S. The future burden of disability in the UK: the time for urgent action is now. *The Lancet Public Health*. 2017. V. 2. I. 7. P. e298–e299.
9. Angela B.M. Employment Of Persons With Disabilities. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*. 2015. V. 191. P. 979–983.
10. Mori Y., Sakamoto N. Economic consequences of employment quota system for disabled people: Evidence from a regression discontinuity design in Japan. *J. Japanese Int. Economies*. 2017. V. 000. P. 1–14.
11. Employment opportunities for persons with different types of disability / T. Boman, A. Kjellberg, B. Danermark, E. Boman. *ALTER, European Journal of Disability Research*. 2015. V. 9. P. 116–129.
12. Aleksandra Polak-Sopinska, Zbigniew Wisniewski, Marta Jedraszek-Wisniewska. HR staff awareness of disability employment as input to the design of an assessment tool of disability management capacity in large enterprises in Poland / 6th International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics (AHFE 2015) and the Affiliated Conferences, AHFE 2015. *Procedia Manufacturing*. 2015. № 3. P. 4836–4843.
13. Ергономічне проектування робочих систем. Основні принципи: ДСТУ EN ISO 6385:2005 (EN ISO 6385:2004, IDT). [Чинний від 2007-12-01]. Київ, 2006.
14. Охорона праці. Терміни та визначення основних понять: ДСТУ 2293:2014. [Чинний від 2015-05-01]. Київ: ННДПБООП, 2014.
15. Про затвердження Положення про експертизу тимчасової непрацездатності: станом на 09 квіт. 2008 р.: Наказ Міністерства охорони здоров'я України від 09.04.2008 № 189. URL: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/z0589-08> (дата звернення: 18.07.2018).
16. Державні санітарні норми та правила «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу»: станом на 08 квіт. 2014 р.: Наказ Міністерства охорони здоров'я України від 08.04.2014 № 248. URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/z0472-14> (дата звернення: 18.07.2018).
17. Питання медико-соціальної експертизи: станом на 03 груд. 2009 р.: Постанова Кабінету Міністрів України від 03.12.2009 № 1317. URL: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/1317-2009-%D0%BF/page> (дата звернення: 18.07.2018).

## **АНАЛИЗ ТРУДОСПОСОБНОСТИ ЛИЦ С ОГРАНИЧЕНИЯМИ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ В КОНТЕКСТЕ БЕЗОПАСНОСТИ ТРУДА**

*Статья посвящена вопросу определения уровня трудоспособности работника с инвалидностью с целью оптимизации процесса подбора рабочего места и обеспечения безопасности труда. Для достижения цели в статье проанализировано понятие трудоспособности в аспекте ограниченных возможностей лиц с инвалидностью и построена диаграмма соответствия возможностей работника с инвалидностью требованиям рабочего места и технологического процесса.*

**Ключевые слова:** *лицо с ограниченными возможностями, безопасность, рабочее место, работоспособность.*

## **ANALYSIS OF THE WORKING CAPACITY OF PERSONS WITH DISABILITY IN THE CONTEXT OF OCCUPATIONAL SAFETY**

*The article is devoted to the problem of optimizing the process of selecting a workplace for the individual characteristics of a person with disabilities in order to ensure labor safety and increase the level of efficiency at the enterprise. To achieve the goal, the article analyzes the concept of working capacity in terms of the limited abilities of persons with disabilities and formulates the basic principles of optimizing the decision-making process in exercising the making a choice of a workplace.*

**Key words:** *person with disabilities, safety, workplace, working capacity.*

УДК 514.18: 678.5.05:004.925.8

**Колосова Е.П.**

Национальный технический университет Украины  
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

**Ванин В.В.**

Национальный технический университет Украины  
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

**Колосов А.Е.**

Национальный технический университет Украины  
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

## **НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ И ПРОЦЕССОВ ФОРМОВАНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ. 2. Моделирование структуры дисперсно-наполненных реактопластов, а также проектирование технологии и оборудования для формования полимерных композитов**

*Проанализированы различные аспекты геометрического моделирования технических объектов и процессов формования ненаполненных и наполненных полимерных композитов. Детально рассмотрены вопросы моделирования структуры и свойств дисперсно-наполненных реактопластов, а также проектирования конструктивно-технологических параметров технических средств для формования полимерных композитов.*

**Ключевые слова:** моделирование, геометрия, структура, фрактал, дисперсный наполнитель, полимер, композит, реактопласт, термопласт.

**Постановка проблемы.** В предыдущем сообщении [1] были рассмотрены некоторые подходы к геометрическому моделированию структуры ориентированных макроволоконистых реактопластичных полимерных композиционных материалов (ПКМ). В то же время практически не были затронуты вопросы моделирования (описания) структуры полимерной матрицы как ненаполненной, так и наполненной дисперсными наполнителями. Также не были отражены подходы к проектированию конструктивно-технологических параметров технических средств формования полимерных композитов с учетом геометрии формируемых изделий.

Заметим, что класс ПКМ не ограничиваются вышеуказанным типом макронаполнителей полимерной матрицы. В соответствии с законами развития природы и диалектики, а также в результате глубокого проникновения исследователей в наномир, постоянно появляются новые типы армирующего наполнителя, в том числе гибридные. Так, например, последние три десятилетия ознаменовались появлением «прорывных» дисперсных углеродных наполнителей наноразмерного

уровня (прежде всего, это фуллерены, углеродные нанотрубки, астралены, кристаллиты, графен, аэрогели графена и другое). Широкое применение этих наполнителей в промышленном масштабе позволяет ожидать появления новых устройств и технологий с «выдающимися» функциональными свойствами, которые по некоторым характеристикам в несколько раз превосходят свойства «традиционных» ПКМ, армированных макроволоконками.

Например, к подобным ПКМ относят: теплоизоляционные (в том числе вспененные и сотовые); электропроводные; электроизоляционные; коррозионностойкие; трещиностойкие; токопроводящие; фрикционные; антифрикционные; гидрофобные; сорбционные; дугостойкие; огнестойкие; бронезащитные; интеллектуальные с сенсорами и актюаторами [2] и другие.

Поэтому актуальным является моделирование структуры и свойств дисперсно-наполненных реактопластов, в первую очередь, наноразмерного уровня. Не менее важным является разработка подходов к проектированию параметров технологии и оборудования для формования ПКМ с учетом геометрии формируемых изделий.

Вышеуказанные аспекты нашли краткое отражение в настоящей статье.

**Целью статьи** является краткий аналитический обзор различных аспектов геометрического моделирования технических объектов и процессов формирования полимерных композитов как наполненных, так и не наполненных, включая моделирование структуры молекулярных структур и дисперсно-наполненных реактопластов, а также проектирования конструктивно-технологических параметров технических средств для формирования полимерных композитов.

#### **Изложение основного материала.**

Подходы к описанию структуры высокомолекулярных веществ.

Как известно, ПКМ состоят из полимерной матрицы, синтезированной на основе высокомолекулярных веществ, а полимер – это высокомолекулярное соединение, состоящее из мономерных звеньев [3]. Причем число мономерных звеньев в полимере (так называемая степень полимеризации) должно быть достаточно велико. А молекулярная масса полимеров составляет величину от нескольких тысяч до нескольких миллионов.

Полимеры характеризуются диверсификацией существующих форм макромолекул, среди которых: линейные, разветвлённые (частный случай – звездообразные), ленточные, плоские, гребнеобразные, полимерные сетки и так далее [4]. Исходя из вышеописанного, становится понятным, почему структура полимеров не может быть описана с помощью единого универсального подхода. Согласно [4], для описания подобных структур условно выделяют четыре структурных уровня: молекулярные; топологические; супрамолекулярные, которые строятся самопроизвольно из комплементарных, то есть имеющих геометрическое и химическое соответствие фрагментов; дисперсионно-коллоидные. Эти уровни, впрочем, являются взаимосвязанными. Очевидно, что вследствие существующего различия между этими уровнями для описания каждого из них необходим индивидуальный подход и описательный «язык».

Так, например, молекулярные структуры низкомолекулярных веществ адекватно описываются в виде химических структур и натуральных формул, то есть только мономерные единицы макромолекул могут быть описаны классическими химическими формулами. В случае высокомолекулярных структур ситуация становится менее детерминированной, что обусловлено *статистической (стохастической) природой* результатов

полимеризации высокомолекулярных веществ. Это означает, что одни и те же исходные реагенты после полимеризации превращаются в продукты, которые отличаются своей конечной молекулярной структурой.

Мономерные единицы разных типов могут быть по-разному распределены в полимерной цепи [4]. То есть они по-разному чередуются, а также образуют последовательности цепей разной длины. Поэтому в результате комбинации макромолекул из одних и тех же исходных реагентов на выходе образуются различные молекулярные структуры. Поэтому для детерминации образуемых молекулярных структур полимера, помимо стандартных химических формул, необходимы более сложные конструкции для количественного описания образуемых последовательностей различных типов мономерных единиц.

Ситуация усложняется при использовании олигомеров (например, эпоксидных) в качестве реагентов, которые принимают участие в построении полимерной цепи. Известно, что синтетические олигомеры характеризуются молекулярной неоднородностью, а также существует их распределение по длинам (так называемое молекулярно-массовое распределение) и распределение по функциональным группам (так называемое распределение функционального типа) [4]. Вышеуказанное, в свою очередь, создает дополнительную неопределенность при детерминации молекулярной структуры образующегося полимера.

Таким образом, вследствие вышеупомянутых типов неоднородностей целесообразно разделить структуру полимера на молекулярном уровне на два нижних подуровня. В качестве последних различают молекулярную структуру мономерной единицы и молекулярную структуру полимерной цепи. При этом классическая взаимосвязь «структура – свойства» используется при описании используемых экспериментальных методов, характеризующих *топологическую структуру* рассматриваемых полимеров [4].

#### **Моделирование структуры дисперсно-наполненных реактопластичных полимерных композитов.**

Вышеуказанное моделирование необходимо, прежде всего, для полимерного материаловедения. При решении этой задачи перспективным направлением является привлечение аппарата *фрактальной геометрии* [5]. В частности, для ПКМ с дисперсными наполнителями наноразмерного уровня, которые инкорпорируются в жидкую полимерную матрицу, эффективным является



использование принципов комбинированного *фрактально-кластерного подхода*. В рамках реализации системного подхода можно отметить, что фрактальная структура полимерного нанокомпозита одновременно обладает двумя свойствами – динамичностью и информативностью. Она также может обеспечивать синергетическое взаимодействие тандема «структура – свойства» такого материала [6].

В статье [7] структура дисперсно-наполненного ПКМ рассматривается как сочетание двух фракталов (мультифракталов) в виде каркаса частиц дисперсного наполнителя (как макро-, микро-, так и наноразмерного уровня) и полимерной матрицы. Принято, что взаимодействие этих двух фракталов сводится к так называемому «возмущению» структуры полимерной матрицы посредством введения в нее каркаса частиц дисперсного наполнителя. В данном случае под «возмущением» структуры полимерной матрицы подразумевают снижение в ней *степени локального порядка*, величина которой для аморфного состояния полимеров [8] предопределяет совокупность конечных технологических и физико-механических свойств полимерной матрицы.

Такой подход обеспечивает моделирование дисперсно-наполненных ПКМ нового поколения. Такие ПКМ содержат в своей структуре различные (в том числе комбинированные) наноразмерные наполнители (фазы). Последние образуют кластеры, которые, в свою очередь, взаимосвязаны с фрактальной структурой основной полимерной фазы [9]. Это создает предпосылки для моделирования структуры затвердевших блок-полимеров, в частности, эпоксидных олигомеров (ЭО) горячего отверждения, с использованием кластерной физической модели аморфного тела и методов *фрактального анализа* [7]. Причем используемые модели и методы взаимно дополняют друг друга, а их отдельное использование не приносит желаемого синергетического результата.

Следует, однако, отметить, что применение фрактального анализа по отношению к структуре аморфных (полимерных) тел дает только общие представления об их структуре. В отличие от фрактального анализа, *кластерная модель* конкретизирует особенности структуры аморфных тел согласно подходов, используемых в физике полимеров. В таком случае вышеуказанное понятие «возмущения» полимерной матрицы при введении в нее дисперсных частиц наполнителя может быть конкретизировано. Например, в виде изменения показателя фрактальной размерности

$D$  затвердевшего дисперсно-наполненного композита [10].

В таком случае изменение величины фрактальной размерности  $D$  наполненного композита свидетельствует об изменении как его структурной организации, включая вариацию его эксплуатационных свойств, так и о состоянии (в том числе объемном распределении) дисперсного наполнителя. Так, например, анализ зависимостей эксплуатационных (физико-механических) свойств таких материалов от их фрактальной размерности подтвердил применимость к таким нанокомпозитам *принципа мультипликативности* [7].

Из положений теории фрактальной геометрии [5] известно, что частицы дисперсного наполнителя, вводимого в жидкую полимерную матрицу, формируют после отверждения последней объемный каркас. Этот каркас также характеризуется фрактальными (в общем случае мультифрактальными [7]) свойствами. В таком случае образованный каркас можно охарактеризовать показателем *фрактальной размерности*. И структура затвердевшей полимерной матрицы также может быть охарактеризована своей размерностью. Поэтому для экспериментально определенной фрактальной размерности  $D$  дисперсно-наполненного затвердевшего композита существует соотношение, связывающее две вышеуказанные размерности (каркаса из дисперсных наполнителей и полимерной матрицы).

В анализируемой кластерной модели аморфного тела, которую репрезентует структура моделируемого дисперсно-наполненного композита, модель рассматривается как набор областей локального порядка (кластеров). Последние погружены в неплотноупакованную (например, оптимальное содержание углеродных нанонаполнителей в полимерной матрице не превышает нескольких процентов, а в общем случае, не превышает даже нескольких десятых процента, то есть является «гомеопатической дозой» [11]) полимерную матрицу.

В такой кластерной модели кластеры представляют собой наборы нескольких коллинеарных плотноупакованных сегментов различных макромолекул. Это является аморфным аналогом кристаллитов с вытянутыми цепями. Относительная доля сегментов различных макромолекул во всей структуре композита является параметром ее *порядка*. При этом величины размерности структуры полимерной матрицы и относительной доли плотноупакованных сегментов различных макромолекул во всей структуре также связаны между собой известным соотношением [7].

Также следует особо отметить характерную особенность структуры полимерных нанокомпозитов. В процессе инкорпорирования нанонаполнителей в жидкую полимерную матрицу образуются крупные агрегаты (или агломераты) частиц наполнителя вследствие его физико-химической природы, в частности, Ван-дер-Ваальсовского взаимодействия. После затвердевания композита эти агрегаты (агломераты) частиц являются концентраторами напряжений, то есть центрами зарождения и дальнейшего распространения трещин в композите при его нагружении.

В связи с этим в адекватных кластерных моделях наполненных полимеров необходимо учитывать изменение такого геометрического параметра, как максимального *эквивалентного радиуса* агрегатов частиц одного размера [7]. Отмечается эффективность применения низкочастотного ультразвука (УЗ) для деагломерации таких частиц [11, 12]. Другие аспекты формования реактопластов, в том числе с использованием УЗ, приведены в [13, 14].

#### **Проектирование технических средств формования реактопластов.**

##### *Структурно-параметрическое геометрическое моделирование.*

В последнее время в среде геометров начало активно развиваться научное направление, известное под названием «методология *структурно-параметрического геометрического моделирования* (СПГМ)». Последняя базируется на применении средств компьютерной техники, что является важным элементом прикладной геометрии и инженерной графики [15]. Использование указанной методологии позволяет при относительно небольших временных затратах получать достаточно точные математические зависимости, которые описывают варианты взаимосвязи между параметрами и характеристиками проектируемых технических объектов и систем.

Так, в частности, применение методологии СПГМ распространяется на сложные геометрические объекты. Среди последних можно выделить различные компоненты и оборудование (инструмент) для машиностроения, а также технологические процессы их изготовления и такое прочее. В рамках СПГМ предпочтительным является применение *системного подхода*. Последний предусматривает представление моделируемого объекта или процесса его формообразования как определенной упорядоченной совокупности некоторых отдельных составляющих компонентов. Они, в свою очередь, могут включать в себя другие составляющие элементы.

Практическое применение рассматриваемой методологии включает принципы комплексного подхода, вариантности, оптимальности, а также принцип открытости и развития, который предусматривает возможность обновления и расширения составляющих компонентов СПГМ [15]. Исходя из базового принципа системного подхода, который предусматривает анализ исследуемого объекта одновременно и как множества определенных взаимосвязанных между собой элементов, и как потенциального компонента высшего иерархического уровня, представляется целесообразным расчленить исследуемую схему объекта на детерминированные укрупненные блоки.

Например, с применением методологии СПГМ может быть спроектировано ультразвуковое (УЗ) дозирующее устройство с прямоугольной излучающей пластиной, которое обеспечивает точный дозированный нанос в структуре тканого полимерного композита [16].

В дальнейшем анализируются только вычлененные укрупненные (базовые) блоки и составляющие их структурные элементы, а также взаимосвязи между ними, в рамках проведения процедуры *синтеза*. Причем исследование всего технологического процесса получения ПКМ (как классических, так и наномодифицированных) и реализующего его оборудования является исключительно сложной задачей, которая до сих пор не решена.

##### *Проектирование технических средств формования термопластов.*

Применение методов геометрического моделирования при проектировании технических средств формования термопластов будет рассмотрено на двух характерных примерах. В первом из них рассматривалась процедура реализации обратной задачи геометрического моделирования при проектировании экструзионных головок червячно-дискового (шнекового) экструдера, используемых для формования профильных изделий из полимерных термопластичных материалов [17].

Целью такого моделирования является определение оптимальной формы канала формирующей головки. Это, в оптимальном, приведет к сбалансированию расхода полимера на выходе из формирующей головки и к получению необходимого профиля изделия. В модельных расчетах учитывались эффекты, связанные с изменением формы и размеров профиля изделия после его выхода из экструзионной головки. Полимер рассматривался как вязкоупругая жидкость, а для описания зависимости скорости сдвига от вязкости перерабатываемого материала применялась модель вязкости Берд-Карро.

Возможность изменения формы формующего канала с использованием алгоритма оптимизации позволяет проводить расчет геометрии формирующих каналов головок по наперед заданным размерам экструдированных изделий [18]. В разработанном подходе геометрия формующего канала экструзионной головки определяется путем решения обратной задачи моделирования. При этом целевой профиль задается как форма экструдата в направлении течения полимера. Формализация решаемой задачи заключается в определении необходимой геометрии формующего канала головки на выходе. Оптимальная геометрия «обеспечивает» выравнивание скоростей полимерного расплава в области свободной поверхности, а также заданную геометрию сечения полимерного профиля [19].

Для применения оптимизирующего алгоритма начальная ограниченная задача преобразуется так, что она может быть решена как серия неограниченных задач. Основной подход заключается в сведении к минимуму псевдо-целевой функции (1) геометрии целевого профиля:

$$\Phi(X) = F(X) + f(X), \quad (1)$$

где  $\Phi(X)$  – псевдо-целевая функция геометрии целевого профиля;  $F(X)$  – постоянные геометри-

ческие параметры;  $f(X)$  – штрафная функция отклонения геометрии профиля от наперед заданного профиля;  $X$  – набор геометрических параметров формующего канала согласно (2):

$$X = \{x^k\}. \quad (2)$$

Для вычисления «обратной задачи экструзии» реализован алгоритм Флетчера-Ривса (ФР), который применяется при детерминации геометрии формующего канала экструзионной головки для обеспечения необходимой формы экструдированного профиля.

Собственно, стратегия оптимизирующего метода ФР [20] состоит в построении последовательности точек,  $k = 0, 1, 2, \dots$ , таких, что выполняется условие  $f(x^{k+1}) < f(x^k)$ ,  $k = 0, 1, 2, \dots$ . Реализация алгоритма ФР проводилась для полимерного изделия, которое представляет собой L-образный однокамерный полый профиль с внешними размерами 15 мм x 30 мм и с внутренним ребром толщиной 1,5 мм (см. рис. 1, а).

Вариация геометрической формы и конструктивных параметров канала с использованием алгоритма оптимизации позволяет проводить расчет геометрии формирующих каналов экструзионных головок по заданным размерам термопластичных экструдированных изделий. Результаты

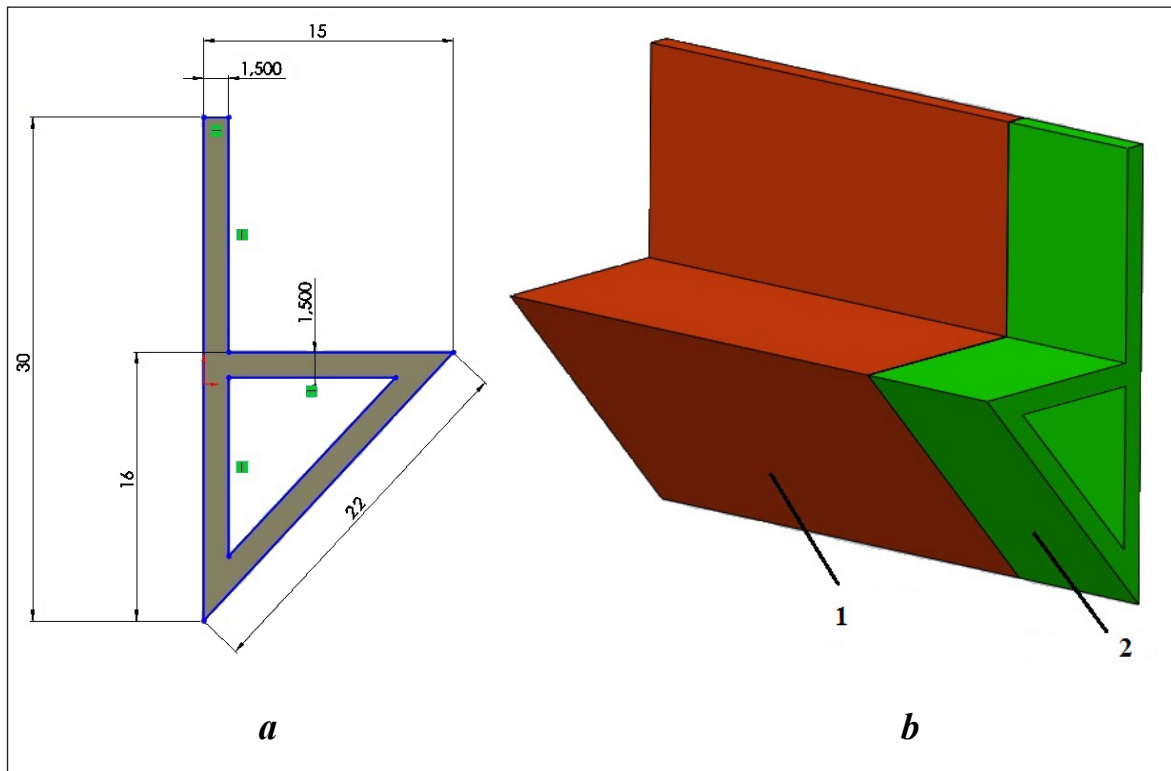
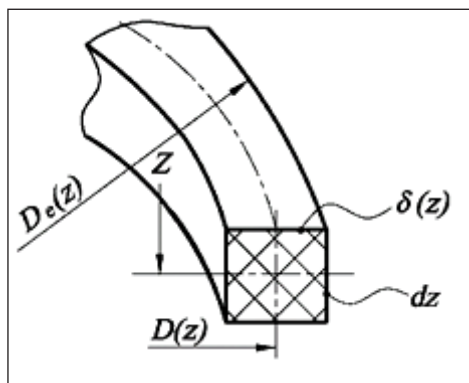


Рис. 1. Расчетная модель формирования изделия [17]: а – натурные размеры сечения экструдированного профиля; б – схема разбивки на участки формующего канала экструзионной головки и вытекающего из нее экструдата (1 – экструдированный профиль; 2 – формующий канал)

проведенних досліджень дозволяють отримувати аналітичні залежності і розраховувати найбільш цілесобразні конструктивні параметри екструзійних головок, а також вибрати оптимальні технологічні параметри процесу отримання виробів, в тому числі складної форми, як із існуючих, так і із нових полімерних композицій.

Ще одним характерним прикладом ефективності застосування геометричного моделювання для технічних об'єктів і процесів є моделювання конструктивно-технологічних параметрів процесу екструзійно-вдувального формування термопластів [21]. При моделюванні використовувалося припущення, що екструдований заготовка для отримання на її основі вдувального виробу представляє собою тонкостінну оболочку із розплавленого полімерного матеріалу, яка має пренебрежимо малу жорсткість. В стінці моделі полімерної оболочкової заготовки виділялося кільце висотою  $dz$  на вертикальній координаті  $z$  (рис. 2).



**Рис. 2.** Геометрія розглянутого участка моделюваної полімерної заготовки [21]:  $\delta(z)$  – товщина стінки полімерної заготовки;  $D_e(z)$  – зовнішній діаметр заготовки;  $D(z) = D_e(z) - \delta(z)$  – середній діаметр заготовки

При моделюванні вважалося, що під дією внутрішнього надлишкового тиску  $p$  полімерна заготовка піддається деформації розтягнення. В той же час деформації в напрямку осі  $OZ$  обмежені конструкцією пресформи для екструзійно-вдувального формування і не бралися до уваги. Таким чином, вважалося, що розтягнення полімерної заготовки відбувається в тангенціальній площині. Цей процес супроводжується збільшенням зовнішнього діаметра  $D_e(z)$  і відповідним зменшенням товщини стінки полімерної заготовки  $\delta(z)$ .

В результаті були отримані аналітичні залежності, що зв'язують геометричні пара-

метри (діаметр, товщина стінки) формуваної полімерної заготовки і параметри кінцевого сформованого виробу, з технологічними параметрами процесу екструзійно-вдувального формування полімерного виробу [21]. В якості останніх використовувалися: швидкість тангенціальної витяжки полімерної заготовки, динамічна в'язкість розплаву полімера, внутрішнє тискування роздування, коефіцієнт тангенціальної витяжки, а також час формування.

Були наведені ілюстрації моделювання різних технологічних режимів. Основні розрахунки проводилися для режимів внутрішнього тискування роздування від 1 кПа до 3 кПа для полімерної заготовки із поліетилену високої густоти при температурі 200°C з ефективною динамічною в'язкістю 8300 Па·с, середнім діаметром полімерної заготовки 0,05 м і товщиною її стінки  $5 \cdot 10^{-3}$  м. Розрахунково-експериментальним шляхом було показано, що процес роздування полімерної заготовки має дві характерні стадії. Перша стадія характеризується помірними режимами деформування і обмежується коефіцієнтом тангенціальної витяжки  $k = 2,5$ . Друга стадія носить інтенсивний характер деформування, що може призвести до дефектів сформованого виробу.

Показано, що одним із шляхів запобігання виникненню дефектів сформованого виробу є зменшення внутрішнього тискування роздування полімерної заготовки. При цьому основним фактором, що обмежує швидкість роздування полімерної заготовки внаслідок підвищення внутрішнього тискування роздування, є максимальний габаритний діаметр сформованого полімерного виробу.

**Висновки.** Обґрунтовано цілесобразність і показана ефективність застосування геометричного моделювання при проектуванні конструктивно-технологічних параметрів технічних засобів для формування термопластичних і реактопластичних композитів. Показано, що для різних об'єктів цілесобразно використання відповідних методів геометричного моделювання. В частині, моделювання структури полімерної матриці як високомолекулярного речовини передбачає привертання апарату топології, а для моделювання структури дисперсно-наповнених композитів цілесобразно використання апарату фрактальної геометрії. В той же час для моделювання технологічного циклу формування композитів ефективно використання методології структурно-параметричного геометричного

моделирования. Указанная методология позволяет на стадии конструкторско-технологического проектирования создать единый и сквозной автоматизированный процесс разработки технологии и технологического инструмента с привлечением различных дисциплин.

Моделирование конструктивно-технологических параметров формования термопластов также имеет свою специфику. Разработанная для конкретных случаев методика позволяет решить обратную задачу процесса экструзионного формования непрерывных изделий на базе реализации алгоритма оптимизации Флетчера-Ривса. Это позволяет при известных свойствах перерабатываемого термопластичного материала и геометрических параметрах получаемого экструзией полимерного изделия спроектировать необходимую

конфигурацию экструзионной головки. А результатом моделирования конструктивно-технологических параметров процесса экструзионно-выдувного формования термопластов являются аналитические зависимости, связывающие геометрические параметры (диаметр, толщина стенки) формуемой полимерной заготовки и параметры конечного сформованного изделия с технологическими параметрами процесса экструзионно-выдувного формования полимерного изделия.

При этом сочетание применяемых структурного и параметрического подходов обеспечивает наглядное воспроизведение состава моделируемого объекта, высокоэффективное компьютерное варьирование многих его параметров и характеристик, а также возможность проведения его комплексной оптимизации.

#### Список литературы:

1. Колосова Е. П., Ванін В. В., Колосов А. Е. Некоторые аспекты геометрического моделирования технических объектов и процессов формования полимерных композитов. 1. Моделирование структуры ориентированных макроволоконистых композитов. Вчені записки Таврійського нац. університету імені В.І. Вернадського. Сер.: Технічні науки. 2018. Т. 29 (68). № 3. С. 1–7.
2. Сівецький В. І., Колосов О. Є., Сокольський О. Л., Івцький І. І. Технології і устаткування для формування виробів з традиційних та інтелектуальних полімерних композиційних матеріалів: монографія. К.: ВПІ ВПК «Політехніка», 2017. 120 с.
3. Берлин Ал. Ал., Вольфсон С. А., Ошмян В. Г., Ениколопов Н. С. Принципы создания композиционных полимерных материалов: монография. М.: Химия, 1990. 240 с.
4. Irzhak V. I., Solov'ev M. E., Irzhak T. F. Architecture of Polymers: Topological Structure–Properties Relationship. Review Journal of Chemistry. 2018. Vol. 8, No. 1. P. 76–182. DOI: 10.1134/S2079978018010028
5. Федер Е. Фракталы: монография. М.: Мир, 1991. 254 с.
6. Ананьева Е. С., Ананьев М. И., Маркин В. Б., Ишков А. В., Новоженев В. А., Новоженев А. В., Ларионова И.С.. Модификация эпоксидианового реактопласта горячего отверждения наноматериалами различной природы. Известия Алтайского государственного университета. 2012. 3(1)75. С. 155–159. <http://izvestia.asu.ru/2012/3-1/chem/01.ru.html>
7. Козлов Г. В., Микитаев А. К. Новый подход к фрактальным размерностям структуры полимерных дисперсно-наполненных композитов. Механика композитных материалов и конструкций. 1996. Т. 2. № 3–4. С. 144–157.
8. Sanditov D.S., Kozlov G.V., Belousov V.N., Lipatov Yu.S. The model of fluctuation free volume and cluster model of amorphous polymers. Ukrainian Polymer Journal. 1992. Vol. 1. No. 3–4. P. 241–258.
9. Ролдугин В. И. Фрактальные структуры в материаловедении. Материаловедение. 2005. № 4. С. 22–29.
10. Новиков В. У., Козлов Г. В. Фрактальная механика наполненных полимеров. Пластические массы. 2005. № 2. С. 21–27.
11. Колосов О. Є. Одержання високоякісних традиційних та наномодифікованих реактопластичних полімерних композиційних матеріалів: монографія. К.: ВПІ ВПК «Політехніка», 2015. 227 с.
12. Колосов О. Є., Сівецький В. І., Колосова О. П. Одержання волокнистонаповнених реактопластичних полімерних композиційних матеріалів із застосуванням ультразвуку: монографія. К.: ВПК «Політехніка», 2015. 295 с.
13. Колосова О. П., Ванін В. В., Вірченко Г. А., Колосов О. Є. Моделювання процесів виготовлення реактопластичних композиційно-волоконистих матеріалів: монографія. К.: ВПК «Політехніка» НТУУ «КПІ», 2016. 164 с.
14. Колосова О. П., Ванін В. В., Колосов О. Є., Сівецький В. І. Моделювання процесів та обладнання для виготовлення реактопластичних матеріалів: монографія. К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. 235 с.
15. 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

16. 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

17. Sokolskii A.L., Kovalenko K.G., Sivetskii V.I., Kolosova E.P. Realization of the reverse problem of geometrical modeling in designing of die heads for the production of polymer products. Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii. 2018. No. 2. P. 109–114. URL: <http://udhtu.edu.ua/public/userfiles/file/VHHT/2018/2/Sokolskii.pdf>

18. Biba N., Stebunov S., Lishny A. 3D FEM Simulation system for optimization of profile extrusion. Quantor Form Ltd. 2004. P. 1–4.

19. Kovalenko K. G., Sivetskyi V. I., Sokolskyi O. L., Mikulonok I. O. Metodyka rozviazannia zvorotnoi zadachi ekstruziinoho formuvannia termoplastiv (in Ukrainian) [Method of extrusion molding of thermoplastics inverse problem solving]. Obrabotka materialov davlenyem: Sbornyk nauchnykh trudov. 2013. № 4(37). P. 177–183.

20. Al-Baali M. Descent Property and Global Convergence of the Fletcher-Reeves Method with Inexact Line Search. Journ. of Num. Analys. 1985. Vol. 5. P. 121–124.

21. Sidorov D. E., Kolosov A. E., Shabliy T. A., Kolosova E. P. Analysis of blown process for producing polymer products by extrusion blow molding. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. No. 2/1 (92). P. 14–21. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.126015

## **ДЕЯКІ АСПЕКТИ ГЕОМЕТРИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНІЧНИХ ОБ’ЄКТІВ І ПРОЦЕСІВ ФОРМУВАННЯ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИТІВ. 2. МОДЕЛЮВАННЯ СТРУКТУРИ ДИСПЕРСНО-НАПОВНЕНИХ РЕАКТОПЛАСТІВ, А ТАКОЖ ПРОЕКТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ФОРМУВАННЯ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИТІВ**

*Проаналізовано різні аспекти геометричного моделювання технічних об’єктів і процесів формування ненаповнених і наповнених полімерних композитів. Детально розглянуто питання моделювання структури і властивостей дисперсно-наповнених реактопластів, а також проектування конструктивно-технологічних параметрів технічних засобів для формування термопластичних і реактопластичних полімерних композитів.*

**Ключові слова:** моделювання, геометрія, структура, фрактал, дисперсний наповнювач, полімер, композит, реактопласт, термопласт.

## **SOME ASPECTS OF GEOMETRICAL MODELING OF TECHNICAL OBJECTS AND PROCESSES FOR FORMING POLYMER COMPOSITES. 2. MODELING OF THE STRUCTURE OF DISPERSE-FILLED THERMOSETS, AS WELL AS THE DESIGN OF TECHNOLOGY AND EQUIPMENT FOR MOLDING POLYMER COMPOSITES**

*Various aspects of geometric modeling of technical objects and processes of molding of unfilled and filled polymer composites are analyzed. The problems of modeling the structure and properties of disperse-filled thermosetting plastics, as well as the design of structural and technological parameters of technical means for forming of thermoplastic and reactoplastic polymer composites, are considered in detail.*

**Key words:** modeling, geometry, structure, fractal, disperse filler, polymer, composite, thermoset, thermoplastic.

# МАШИНОЗНАВСТВО

УДК 621.22

**Петров О.В.**

Вінницький національний технічний університет

**Козлов Л.Г.**

Вінницький національний технічний університет

**Трофимчук М.В.**

Вінницький національний технічний університет

## ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ «ЛП-ПОШУКУ» ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ ПЕРЕЛИВНОГО КЛАПАНА ГІДРОРОЗПОДІЛЬНИКА ДЛЯ LS-ГІДРОПРИВОДІВ

*У статті розглянуто застосування методу «ЛП-пошуку» для оптимізації параметрів переливного клапана гідророзподільника для LS-гідроприводів. Завдання оптимізації полягає у визначенні такої сукупності параметрів переливного клапана, яка дозволить забезпечити необхідні динамічні та статичні характеристик гідроприводу, а також зменшення втрат потужності на основі оптимальної величини зрівноважувального перепаду тиску у різних режимах роботи гідроприводу.*

**Ключові слова:** LS-гідропривод, переливний клапан, гідророзподільник, оптимізація, втрати потужності, характеристики гідроприводу.

**Постановка проблеми.** Мобільні робочі машини з гідроприводом, що виготовляються та експлуатуються в Україні, оснащені гідравлічним обладнанням дискретної дії. Це зумовлено низькою вартістю та достатньою надійністю таких гідроприводів, але при цьому мають місце втрати потужності гідроприводу. Це зумовлено тим, що сумарні втрати потужності залежать від тиску настройки запобіжного клапана гідророзподільника і при малих швидкостях гідродвигуна та тиску навантаження меншого за величину тиску настройки запобіжного клапана, надлишок робочої рідини надходить на злив за умов максимального значення тиску. Особливо це проявляється під час роботи гідроприводів у режимах регулювання витрати гідродвигуна, розвантаження гідронасоса та захисту від перевантаження. Зменшити втрати потужності можна за рахунок використання гідророзподільника з переливним клапаном, який забезпечує роботу гідродвигунів під тиском у напірній гідролінії, що відповідає навантаженому гідродвигуну, а також забезпечує контроль величини витрат робочої рідини в робочих контурах і автоматичному коректуванні величини витрати в напірній гідролінії за умов відхилення тиску від заданих значень. Зменшення

втраченої потужності забезпечується підтримкою постійного зрівноважувального перепаду тиску  $\Delta p$  на робочому вікні дроселюючого елемента гідроприводу за допомогою переливного клапана. При цьому надлишок робочої рідини під час дроселювання зливається через переливний клапан у бак під тиском  $\Delta p$ . Таким чином, зменшення втраченої потужностей щодо виробленої потужності забезпечує у гідроприводі підвищення ККД системи керування. Гідроприводи, які оснащені гідророзподільниками з переливними клапанами, що забезпечують постійну величину зрівноважувального перепаду тиску  $\Delta p$  на робочому вікні дроселюючого елемента гідроприводу називаються LS-гідроприводи (Load Sensing – (з англ.) «чутливий до навантаження»). Такі гідроприводи детально описані у зарубіжній технічній літературі та широко використовуються для оснащення мобільних робочих машин відомих виробників Atlas, Liebherr, (Німеччина), Caterpillar, (США), Komatsu (Японія) та інших [1,2]. Дослідження та впровадження у виробництво LS-гідроприводів для потреб вітчизняних виробників є актуальним завданням. Одним з основних етапів проектування таких гідроприводів є дослідження параметрів гідророзподільників, що забезпечуватимуть

постійну величину зрівноважувального перепаду тиску  $\Delta p$ , для різних режимів роботи з одночасним забезпеченням необхідних значень деяких динамічних та статичних характеристик. Вибрати такі параметри можна за рахунок проведення оптимізації на основі багатьох критеріїв.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Серед широкого кола методів оптимізації таких завдань був вибраний метод «ЛП-пошуку» – ефективний метод знаходження оптимальних значень у завданнях із багатьма умовами [3]. Метод «ЛП-пошуку» також є універсальним інструментом, оскільки на його основі можна створювати власні критерії оптимізації параметрів залежно від складності прикладних задач.

**Постановка завдання.** У розробленому авторами LS-гідроприводі величина зрівноважувального перепаду тиску  $\Delta p$ , формується сукупністю параметрів переливного клапана гідророзподільника, якими є такі:  $c$  – жорсткість пружини золотника переливного клапана,  $d_k$  – діаметр золотника переливного клапана та  $d_x$  – діаметр хвостовика золотника переливного клапана,  $f_0$  – площа допоміжного дроселя переливного клапана [4]. При цьому розглядаються динамічні характеристики гідроприводу:  $\sigma$  – величина перерегулювання за тиском гідронасоса та  $T_p$  – час перехідного процесу. Статичною характеристикою гідроприводу розглядається величина похибки стабілізації витрати гідродвигуна  $A$ . Для забезпечення зменшення втрат потужності у гідроприводі під час роботи у широкому діапазоні тисків та витрат також слід розглянути різні режими роботи: регулювання витрати гідродвигуна, розвантаження гідронасоса та захисту від перевантаження. Таким чином, із метою підвищення ККД системи керування гідроприводом та забезпечення вимог до його динамічних ( $\sigma < 30\%$ ,  $T_p < 0,5$  с) і статичних характеристик ( $A < 15\%$ ) необхідно провести оптимізацію, що дозволить обґрунтовано вибрати оптимальні параметри переливного клапана гідророзподільника для LS-гідроприводу.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Метод «ЛП-пошуку» має універсальне застосування, що дозволяє знаходити оптимальні значення у багатокритеріальних завданнях, що можуть бути об'єднані у вигляді комплексного критерію [5; 6]. У цій роботі метод «ЛП-пошуку» виконуватиметься за таким алгоритмом:

1) складання параметричних обмежень: проводиться вибір параметрів та критерію оптимізації, виконуються розрахунки та складається таблиця результатів;

2) оцінювання отриманих послідовностей за відхиленням та нерівномірністю;

3) вибір кроку та ранжування показників критерію;

4) вибір критеріальних обмежень;

5) пошук найкращих сукупностей параметрів оптимізації;

Оптимізація проводитиметься при температурі робочої рідини  $t = 50^\circ\text{C}$ .

Критерій оптимізації за рівнем рангу включає:

1) величину зрівноважувального перепаду тиску  $\Delta p$ ;

2) час перехідного процесу  $T_p$ ;

3) величину  $\sigma$  перерегулювання за тиском;

4) величину  $A$  похибки стабілізації витрати гідродвигуна.

Критерій оптимізації також включає режими роботи гідроприводу:

1) режим регулювання витрати гідродвигуна;

2) режим розвантаження гідронасоса;

3) режим захисту від перевантаження.

Параметрами оптимізації обрано конструктивні параметри переливного клапана гідророзподільника, що впливають на формування величини зрівноважувального перепаду тиску  $\Delta p$  (рис. 1):  $d_k$ ,  $d_x$  та  $f_0$ .

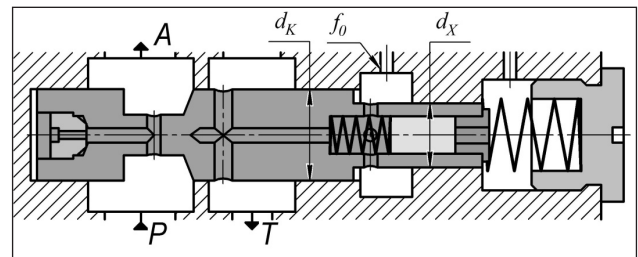


Рис. 1. Конструктивні параметри переливного клапана гідророзподільника

Параметри оптимізації розглядалися при таких значеннях:

–  $d_k = (18; 19; 20; 21; 22) \cdot 10^{-3}$  м;

–  $d_x = (9; 10; 11; 12) \cdot 10^{-3}$  м;

–  $f_0 = (0,8; 0,9; 1,0; 1,1) \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>.

Під час зміни вказаних параметрів оптимізації виконані розрахунки за допомогою математичного моделювання та отримані значення критерію оптимізації. Усього отримано  $N = 80$  сукупностей параметрів та відповідних значень критеріїв оптимізації.

Оцінка відхилення отриманої послідовності  $D(\Pi)$  проводиться у порівнянні з послідовності з кубічними решітками  $D(\Pi KP)$ :

$$D(\Pi) < D(\Pi KP). \quad (1)$$

Розрахунок відхилення отриманої послідовності  $D(\Pi)$  виконується за формулою (через біноміальний коефіцієнт):



Вибірка найкращої сукупності параметрів оптимізації

Параметри оптимізації			Критерій оптимізації					№
$d_k, \text{м}$	$d_x, \text{м}$	$f_0, \text{м}^2$	режим	МПа	Тр, с	$\sigma, \%$	A, %	
20·10-3	11·10-3	0,9·10-6	1	$\Delta p = 0,74$	0,26	13,6	10,7	42
			2	$pH = 0,31$	0,15	–	–	
			3	$\Delta p = 0,82$	0,39	19,3	–	

$$D(\Pi) = 2^v \cdot \sum_{j=0}^{n-1} \binom{v-\tau}{j}, \quad (2)$$

де  $n$  – розмірність послідовності (в даному випадку  $n = 3$ , при якому  $\tau = 3$ ),

$$v = \log_2 N.$$

Звідси:

$$D(\Pi) = 2^3 \cdot \sum_{j=0}^{4-1} \binom{\log_2 80 - 3}{j} = 3,77.$$

Розрахунок відхилення послідовності з кубічними решітками  $D(\Pi KP)$  виконується за формулою:

$$D(\Pi KP) = \frac{1}{2} \cdot N^{1-1/n}, \quad (3)$$

Звідки:

$$D(\Pi KP) = \frac{1}{2} \cdot 80^{1-1/3} = 9,28.$$

Відповідно до умови (1)  $D(\Pi) < D(\Pi KP) = 3,77 < 9,28$  – умова виконується.

Оцінка нерівномірності отриманої послідовності  $\phi(\Pi)$  проводиться у порівнянні з послідовністю з кубічними решітками  $\phi(\Pi KP)$ :

$$\phi(\Pi) < \phi(\Pi KP). \quad (4)$$

Розрахунок нерівномірності отриманої послідовності  $\phi(\Pi)$  виконується за формулою:

$$\phi(\Pi) = 2^{n-1+\tau}. \quad (5)$$

Звідси:

$$\phi(\Pi) = 2^{3-1+3} = 0,5.$$

Розрахунок нерівномірності послідовності з кубічними решітками  $\phi(\Pi KP)$  виконується за формулою:

$$\phi(\Pi) = N^{1-1/n}, \quad (6)$$

Звідки:

$$\phi(\Pi) = 80^{1-1/3} = 18,566.$$

Відповідно до умови (4)  $\phi(\Pi) < \phi(\Pi KP) = 0,5 < 18,566$  – умова виконується.

Отже, отримана послідовність рівномірно розподілена з допустимим відхиленням.

Крок показників критерію оптимізації обчислюється за формулою:

$$h(f) = \frac{f_{\max} - f_{\min}}{M}, \quad (7)$$

де  $h(f)$  – крок критерію,

$f_{\max}$  – максимальне отримане значення критерію,

$f_{\min}$  – мінімальне отримане значення критерію,

$M$  – фіксоване ціле число, рекомендоване 10.

Отже, відповідно до формули (7), визначимо три значення кроку критерію:

$$h(Tp) = \frac{Tp_{\max} - Tp_{\min}}{10} = \frac{0,71 - 0,15}{10} = 0,056 \text{ с},$$

$$h(\sigma) = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{10} = \frac{23,7 - 12,6}{10} = 1,1\%,$$

$$h(A) = \frac{A_{\max} - A_{\min}}{10} = \frac{20,4 - 9,6}{10} = 1,08\%.$$

Ранжування показників критерію виконаємо відповідно до необхідності забезпечення динаміки гідроприводу, тому під час вибору сукупностей параметрів оптимізації розглядатиметься величина перерегулювання  $\sigma$  за тиском, далі часу перехідного процесу  $Tr$  та величина  $A$  похибки стабілізації витрати гідродвигуна.

Вибір критеріальних обмежень має на меті вилучення з отриманої послідовності сукупностей параметрів оптимізації, що призвели до перевищення значень показників критерію оптимізації:  $\sigma > 30\%$ ,  $Tr > 0,5 \text{ с}$  і  $A > 15\%$ .

Пошук найкращих показників зводиться до того, що по першому значенні кроку критерію і відповідно до ранжування відшукуються сукупності, що потрапили в інтервал. Після вибору сукупностей по першому за рангом критерію проходить відбір сукупностей по другому за рангом критерію, і так далі по третьому критерію. У результаті можна отримати одну чи декілька сукупностей параметрів, що можуть вважатися оптимальними. Найкращою визнано сукупність № 42 (табл. 1).

Отже, в результаті оптимізації отримані параметри переливного клапана гідро розподільника: діаметр золотника переливного клапана  $d_k = 20 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ , діаметр хвостовика золотника переливного клапана  $d_x = 11 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  та площа допоміжного дроселя переливного клапана  $f_0 = 0,9 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$ . Така сукупність конструктивних параметрів гідророзподільника у розробленому LS-гідроприводі в режимі регулювання витрати гідродвигуна забезпечують величину зрівноважувального перепаду тиску  $\Delta p = 0,74 \text{ МПа}$  при значеннях величини перерегулювання за тиском  $\sigma = 13,6\%$ , часу перехідного процесу  $Tr = 0,21 \text{ с}$  та величини похибки

стабілізації витрати гідродвигуна  $A = 10,75\%$ , в режимі розвантаження гідронасоса злив робочої рідини під тиском  $pH = 0,31$  МПа при  $Tr = 0,15$ , в режимі захисту від перевантаження  $\Delta p = 0,82$  МПа при значеннях  $\sigma = 19,3\%$  та  $Tr = 0,39$  с.

**Висновки.** На основі запропонованого критерію, що враховує динамічні та статичні характеристики гідроприводу в режимах регулювання витрати гідродвигуна, розвантаження гідронасоса та захисту від перевантаження, методом

«ЛП-пошуку» знайдено оптимальне сполучення параметрів  $d_k = 20 \cdot 10^{-3}$  м,  $d_x = 11 \cdot 10^{-3}$  м та  $f_0 = 0,9 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>, за якого в режимі регулювання витрати гідродвигуна у гідроприводі забезпечується величина врівноважуючого перепаду тиску  $\Delta p = (0,7 \dots 0,8)$  МПа при  $Tr = 0,26$  с,  $\sigma = 13,6\%$ ,  $A = 10,7\%$ , в режимі розвантаження гідронасоса  $pH = (0,3 \dots 0,4)$  МПа при  $Tr = 0,15$  с, в режимі захисту від перевантаження  $\Delta p = (0,8 \dots 0,9)$  МПа,  $Tr = 0,39$  та  $\sigma = 19,3\%$ .

#### Список літератури:

1. Бондарь В.А. Система Load-Sensing в сельскохозяйственной технике. Вибрации в технике и технологиях. Вінниця: ВДАУ, 2003. №4 (30). С. 19–25.
2. Козлов Л.Г., Петров О.В. Энергоощадный гидропривод, чувливый до навантаження, на базі мультирежимного гідро розподільника. Промислова гідраліка і пневматика. Вінниця: ВНАУ, 2012. № 2 (36). С. 77–80.
3. Петров О.В., Козлов Л.Г. Формування величини зрівноважувального перепаду тиску в гідроприводі, чутливому до навантаження, на базі мультирежимного гідро розподільника. Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2012. № 2. С. 179–184.
4. Соболев И.М., Статников Р.Б. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. Москва: Наука, 1981. 111 с.
5. Буренников Ю.А., Козлов Л.Г., Лозінський Д.О. Оптимізація системи управління гідророзподільником з електрогідралічним регулюванням. Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2005. № 6. С. 225–229.
6. Козлов Л.Г., Крещенецький Л.В., Петров О.В. Оптимізація конструктивних параметрів гідророзподільника для гідроприводів, чутливих до навантаження мобільних робочих машин. Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету. № 36. 2007. С. 74–76.

#### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА «ЛП-ПОИСКА» ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕЛИВНОГО КЛАПАНА ГИДРОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЯ ДЛЯ LS-ГИДРОПРИВОДОВ

*В статтє рассмотрено использование метода «ЛП-поиска» для оптимизации параметров переливного клапана гидрораспределителя для LS-гидроприводов. Задача оптимизации состоит в определении такой совокупности параметров переливного клапана, которая позволит обеспечить необходимые динамические и статические характеристики гидрораспределителя, а также уменьшение потерь мощности на основе оптимальной величины уравновешивающего перепада давления в разных режимах работы гидрораспределителя.*

**Ключевые слова:** LS-гидропривод, переливной клапан, гидрораспределитель, оптимизация, потери мощности, характеристики гидрораспределителя.

#### USING THE «LP-SEARCH» METHOD FOR OPTIMIZING PARAMETERS OF THE RELIEF VALVE OF THE DIRECTIONAL CONTROL VALVE FOR THE LOAD-SENSING HYDRAULIC DRIVES

*The scientific article is developed to use of the «LP-search» method for optimizing the parameters of the relief valve of the directional control valve for load-sensing hydraulic drives. The task of optimization consists in determining such a set of parameters of the relief valve that will provide the necessary dynamic and static characteristics of the hydraulic drive, as well as reducing power losses based on the optimal value of the balancing differential pressure in different operating modes of the hydraulic drive.*

**Key words:** load-sensing hydraulic drive, relief valve, directional control valve, optimizing, power losses, characteristics of the hydraulic drive.

# ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 621.874:62-783

**Семенюк В.Ф.**

Одесский национальный политехнический университет

**Лингур В.Н.**

Одесский национальный политехнический университет

## ОБОСНОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ЗАЩИТЫ ГРУЗОПОДЪЕМНЫХ КРАНОВ МОСТОВОГО ТИПА ОТ СИСТЕМАТИЧЕСКИХ ПЕРЕГРУЗОК

*В статье обоснована необходимость защиты кранов мостового типа от систематических перегрузок. Получены аналитические зависимости для определения динамических нагрузок, возникающих в подъемных канатах при подъеме груза. Определена жесткость дополнительного упругого звена, введение которого в силовую цепь механизма подъема позволяет предотвратить систематические перегрузки крана. Сформулированы требования к конструкции дополнительного упругого звена. Даны рекомендации для создания конструкции дополнительного упругого звена.*

**Ключевые слова:** кран мостового типа, систематические перегрузки, дополнительное упругое звено, динамические нагрузки, жесткость дополнительного упругого звена.

**Постановка проблемы.** Одним из наиболее распространенных средств механизации погрузочно-разгрузочных работ на промышленных предприятиях, строительных площадках, в речных и морских портах, на железнодорожном транспорте являются грузоподъемные краны, обеспечивающие подъем груза, перемещение его на незначительное расстояние и опускание с помощью грузозахватного устройства [1, с. 27]. К кранам мостового типа относят мостовые и козловые краны, мостовые перегружатели, кабельные и мостокабельные краны, а также мостовые краны-штабелеры.

Краны мостового типа должны оборудоваться ограничителями грузоподъемности в том случае, когда возможна перегрузка их по технологическим причинам. Ограничитель грузоподъемности крана мостового типа не должен допускать перегрузку более чем на 25% [2, с. 143]. К кранам, в которых перегрузки возникают по технологическим причинам, относят мостовые краны грейферные и магнитные, краны предприятий строительной индустрии, используемые для извлечения готовых железобетонных изделий из пропарочных камер, краны, работающие на открытых складах, когда не исключено прилипание или примерзание к грунту поднимаемых грузов, краны, используемые для демонтажа оборудования, и др.

Кроме того, перегрузки могут возникнуть при эксплуатации кранов в обычных производствен-

ных условиях из-за возможных ошибок при визуальной оценке массы поднимаемого груза или нарушения машинистом правил эксплуатации кранов.

Оснащение кранов ограничителями нагрузки позволяет сократить число поломок, уменьшить время простоев, исключить опасность для обслуживающего персонала, предохранить от повреждения оборудование, находящееся в зоне работы кранов, снизить нагрузки на строительные конструкции.

Причиной перегрузки может быть не только подъем груза, превышающего номинальную грузоподъемность крана, но и возникающие при подъеме груза динамические нагрузки. Так, при подъеме груза «с подхватом» отношение максимальной динамической нагрузки к статической нагрузке для различных механизмов подъема составляет от 1,35 до 1,94 [3, с. 101]. Если создать систему защиты крана таким образом, что при каждом превышении нагрузки более чем на 25% будет срабатывать ограничитель грузоподъемности, то кран не сможет поднимать грузы, даже соответствующие номинальной грузоподъемности крана. Поэтому целесообразно в системе защиты мостовых кранов от перегрузки предусмотреть две функции: защиты крана от пиковых перегрузок, которые во много раз превышают допустимый уровень, и защиты кранов от

систематических перегрузок, представляющих собой относительно небольшие по величине перегрузки, возникающие чаще всего в результате подъема груза близкого по значению к номинальной грузоподъемности крана, но при больших ускорениях.

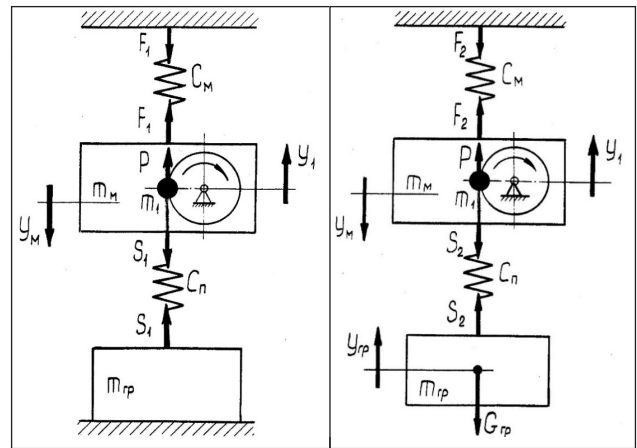
**Анализ последних исследований и публикаций.** Большинство из выполненных до сих пор исследований в области защиты мостовых кранов от перегрузки посвящено разработке, исследованию и определению основных параметров различных ограничителей грузоподъемности, выбору критериев для оценки их работы.

Для защиты грузоподъемных кранов от перегрузки наиболее часто применяют способ отключения электродвигателя. Недостатком такого способа является то, что для мостовых кранов при подъеме груза массой выше допустимой, после срабатывания ограничителя грузоподъемности поднимаемый груз оказывается поднятым над основанием и, несмотря на срабатывание ограничителя, кран оказывается перегруженным до тех пор, пока крановщик не опустит груз на основание. Это подтверждают исследования характера изменения усилий подъема при срабатывании ограничителя грузоподъемности, работающего по способу отключения электродвигателя механизма подъема [4, с. 229–246].

Способ защиты крана путем отключения электродвигателя механизма подъема груза и наложения тормоза, хотя и предотвращает работу крана с грузом недопустимо большой массы, но не решает задачу защиты элементов крана от опасных перегрузок, так как при простом отключении двигателя поднимаемый груз (масса которого значительно превышает номинальную) успеет оторваться от основания и длительное время остается в поднятом состоянии [5, с. 38–44]. Для повышения эффективности предохранения кранов от перегрузок предложен способ воздействия ограничителя грузоподъемности на механизм подъема, который позволяет при срабатывании ограничителя переключать подъемный двигатель на короткое время для работы на спуск груза [5, с. 42]. При таком способе поднимаемый груз все равно некоторое время остается в поднятом состоянии и перегружает кран.

В последнее время выполнены несколько диссертаций посвященных защите мостовых кранов от перегрузки [6; 7]. Но задача защиты мостовых кранов от систематических перегрузок не решена.

**Постановка задания.** Целью настоящей работы является обоснование возможности



**Рис. 1. Расчетная динамическая схема мостового крана в «доотрывной» стадии движения**

**Рис. 2. Расчетная динамическая схема мостового крана в «послеотрывной» стадии движения**

защиты грузоподъемных кранов мостового типа от систематических перегрузок путем введения в систему подвески груза дополнительного упругого звена.

Для реализации поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- разработать математическую модель процесса подъема груза с основания «с подхватом»;
- найти аналитическую зависимость для определения максимального значения усилия в подъемных канатах после отрыва груза от основания;
- найти аналитическую зависимость для определения жесткости дополнительного упругого звена, введение которого в силовую цепь механизма подъема позволит предотвратить систематические перегрузки крана.

**Изложение основного материала исследования.** Для определения динамических нагрузок, действующих на подъемные канаты, а также на металлоконструкцию крана, рассмотрим движение системы «кран-груз» в «доотрывной» (рис. 1) и «послеотрывной» (рис. 2) стадиях. На этих рисунках приняты следующие обозначения:  $m_m$  – масса моста и тележки, приведенная к вертикальной деформации моста  $y_m$ , отсчитываемой от статического положения моста при условии отсутствия груза на крюке крана;  $c_m$  – жесткость моста в точке подъема груза;  $m_1$  – масса вращающихся частей механизма подъема, приведенная к поступательному перемещению  $y_1$ , совпадающему с направлением перемещения груза  $y_{gp}$ ;  $c_n$  – жесткость канатной подвески груза;  $m_{gp}$  – масса груза;  $G_{gp}$  – вес груза;  $P$  – усилие подъемного двигателя, приведенное к поступательному

перемещению груза;  $S_1$  и  $S_2$  – суммарное усилие в подъемных канатах соответственно до отрыва груза и после отрыва груза от основания;  $F_1$  и  $F_2$  – усилие, действующее на мост крана, возникающее при подъеме груза в «доотрывной» и «послеотрывной» стадиях движения соответственно.

«Доотрывная» стадия.

Уравнения движения системы «кран-груз» в «доотрывной» стадии имеют вид

$$\begin{aligned} m_m \ddot{y}_m &= S_1 - F_1; \\ m_1 \ddot{y}_1 &= P - S_1, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\text{где } S_1 = c_n (y_1 - y_m); F_1 = c_m y_m. \quad (2)$$

Приведенное движущее усилие электродвигателя механизма подъема

$$P = 2M \frac{u_p \cdot \eta_{\text{мех}} \cdot a}{D_6 + d}, \quad (3)$$

где  $M$  – момент двигателя механизма подъема;  $u_p$  – передаточное число редуктора механизма подъема;

$\eta_{\text{мех}}$  – КПД механизма подъема;

$a$  – кратность полиспаста;

$D_6$  – диаметр барабана механизма подъема;

$d$  – диаметр каната.

Приняв прямолинейный характер механических характеристик низших ступеней асинхронных электродвигателей, а также характеристик их высших ступеней в области номинального момента, найдем, что движущее усилие на данном этапе изменяется по зависимости

$$P = P_0 - \beta \dot{y}_1, \quad (4)$$

где  $P_0$  – усилие в момент пуска электродвигателя при числе оборотов, равном нулю;

$\dot{y}_1$  – скорость приведенной массы вращающихся частей механизма подъема;

$\beta$  – коэффициент жесткости механической характеристики

$$\beta = \eta_{\text{мех}} \frac{2M_0}{\pi \cdot n_0} \left( \frac{u_p \cdot a}{D_6 + d} \right)^2, \quad (5)$$

Здесь:  $M_0$  – момент на валу двигателя при скорости вращения, равной нулю; определяется при условии прямолинейности характеристик электродвигателя механизма подъема;  $n_0$  – число оборотов электродвигателя механизма подъема, соответствующее его синхронной скорости.

Подставляя значения  $S_1$ ,  $F_1$  и  $P$  в (1), получим дифференциальные уравнения, описывающие движение динамической системы на «доотрывной» стадии

$$\begin{aligned} m_m \ddot{y}_m + (c_n + c_m) y_m - c_n y_1 &= 0; \\ m_1 \ddot{y}_1 + \beta \dot{y}_1 + c_n (y_1 - y_m) &= P_0. \end{aligned} \quad (6)$$

Начальные условия для рассматриваемой стадии движения системы в случае подъема груза с подхватом

$$t_1 = 0, y_m = 0, \dot{y}_m = 0, y_1 = 0, \dot{y}_1 = (\dot{y}_1)_0, \quad (7)$$

при этом  $(\dot{y}_1)_0$  – скорость массы  $m_1$ , соответствующая скорости холостого хода электродвигателя механизма подъема, равна

$$(\dot{y}_1)_0 = \frac{\pi \cdot n_0 (D_6 + d)}{u_p \cdot a}. \quad (8)$$

Условием перехода к «послеотрывной» стадии движения динамической системы является равенство

$$(S_1)_1 = G_{ep}, \quad (9)$$

где  $(S_1)_1$  – усилие в подъемных канатах в конце «доотрывной» стадии.

«Послеотрывная» стадия.

После отрыва груза от основания движение системы описывается уравнениями

$$\begin{aligned} m_m \ddot{y}_m &= S_2 - F_2; \\ m_1 \ddot{y}_1 &= P - S_2; \\ m_{ep} \ddot{y}_{ep} &= S_2 - G_{ep}. \end{aligned} \quad (10)$$

Усилие в металлоконструкции и натяжение канатов определяются выражениями

$$F_2 = c_m y_m; S_2 = c_n (y_1 - y_m - y_{ep}). \quad (11)$$

С учетом (11) система дифференциальных уравнений (10) запишется в следующем виде

$$\begin{aligned} m_m \ddot{y}_m + (c_m + c_n) y_m - c_n y_1 + c_n y_{ep} &= 0; \\ m_1 \ddot{y}_1 + \beta \dot{y}_1 + c_n (y_1 - y_m - y_{ep}) &= P_0; \\ m_{ep} \ddot{y}_{ep} - c_n (y_1 - y_m - y_{ep}) &= -G_{ep}. \end{aligned} \quad (12)$$

Начальные условия для данной стадии движения

$$\begin{aligned} t_2 = 0, y_m &= (y_m)_1, \dot{y}_m = (\dot{y}_m)_1, \\ y_1 &= (y_1)_1, \dot{y}_1 = (\dot{y}_1)_1, y_{ep} = 0, \dot{y}_{ep} = 0, \end{aligned} \quad (13)$$

где  $(y_m)_1, (y_1)_1, (\dot{y}_m)_1, (\dot{y}_1)_1$  – перемещения и скорости масс  $m_m$  и  $m_1$  в конце доотрывной стадии движения.

Численное решение систем дифференциальных уравнений (6) и (12) может быть выполнено с использованием метода Рунге-Кутты.

Найдем аналитическую зависимость для определения усилий  $S_1$  и  $S_2$ . Примем, что окружная скорость вала двигателя в процессе подъема груза с основания при работе двигателя на естественной механической характеристике постоянна и равна  $(\dot{y}_1)_0$  [5, с. 21], тогда  $y_1 = (\dot{y}_1)_0 t$ , и система дифференциальных уравнений (6) превращается в одно уравнение

$$m_m \ddot{y}_m + (c_m + c_n) y_m = c_n (\dot{y}_1)_0 t. \quad (14)$$

или

$$\ddot{y}_m + \frac{c_m + c_n}{m_m} y_m = \frac{c_n}{m_m} (\dot{y}_1)_0 t. \quad (15)$$

Общее решение линейного неоднородного уравнения (15)

$$y_m = A \cos \sqrt{\frac{c_m + c_n}{m_m}} t + B \sin \sqrt{\frac{c_m + c_n}{m_m}} t + \frac{c_n}{c_m + c_n} (\dot{y}_1)_0 t. \quad (16)$$

Начальные условия при  $t_1 = 0, y_m = 0, \dot{y}_m = 0, u = 0$ ,

$$B = -\frac{\frac{c_n}{c_m + c_n}(\dot{y}_1)_0}{\sqrt{\frac{c_m + c_n}{m_m}}}. \quad (17)$$

С учетом (17)

$$y_m = \frac{c_n}{c_m + c_n}(\dot{y}_1)_0 \left[ t - \frac{1}{\sqrt{\frac{c_m + c_n}{m_m}}} \sin \sqrt{\frac{c_m + c_n}{m_m}} t \right]. \quad (18)$$

Усилие в подъемных канатах до отрыва груза от основания

$$S_1 = \frac{c_n}{c_m + c_n}(\dot{y}_1)_0 \left[ c_m t + c_n \frac{\sin \sqrt{\frac{c_m + c_n}{m_m}} t}{\sqrt{\frac{c_m + c_n}{m_m}}} \right]. \quad (19)$$

В момент отрыва  $(S_1)_1 = G_{ep}$  а, следовательно, продолжительность  $t_1$  «доотрывной» стадии определится из уравнения

$$\frac{c_n}{c_m + c_n}(\dot{y}_1)_0 \left[ c_m t_1 + c_n \frac{\sin \sqrt{\frac{c_m + c_n}{m_m}} t_1}{\sqrt{\frac{c_m + c_n}{m_m}}} \right] = G_{ep}. \quad (20)$$

При рассмотрении «послеотрывной» стадии учтем, что при  $t_2 = 0$

$$c_n(y_1 - y_m - y_{ep}) = G_{ep} + c_n(y_1 - y_m - y_{ep}). \quad (21)$$

где  $y_1, y_m, y_{ep}$  – отсчитываются от начала «послеотрывной» стадии и при  $t_2 = 0; y_1 = 0; y_m = 0; y_{ep} = 0$ .

Приняв это во внимание, а также допустив, что  $P = G_{ep}$  в начале «послеотрывной» стадии, запишем систему дифференциальных уравнений (12) в следующем виде:

$$\begin{aligned} m_m \ddot{y}_m + c_m y_m - c_n(y_1 - y_m - y_{ep}) &= 0; \\ m_1 \ddot{y}_1 + c_n(y_1 - y_m - y_{ep}) &= G_{ep}; \\ m_{ep} \ddot{y}_{ep} - c_n(y_1 - y_m - y_{ep}) &= 0. \end{aligned} \quad (22)$$

Для упрощения решения системы предположим, что динамическая деформация несущей металлоконструкции мало отличается от статической деформации, то есть

$$c_m y_m \approx c_n(y_1 - y_m - y_{ep}). \quad (23)$$

Как отмечается в [3, с. 97], это предположение вносит весьма малую ошибку в результат.

Умножая второе уравнение системы (22) на  $m_{ep}$ , а третье уравнение на  $m_1$  и вычитая из второго уравнения третье, после преобразований получим

$$m_1 m_{ep}(\ddot{y}_1 - \ddot{y}_{ep}) + (m_1 + m_{ep})c_n(y_1 - y_m - y_{ep}) = m_{ep} G_{ep}. \quad (24)$$

Обозначив  $c_m \cdot c_n / (c_m + c_n) = c$ , из (23) получим

$$c_n(y_1 - y_m - y_{ep}) = c(y_1 - y_{ep}). \quad (25)$$

Тогда, учитывая (25), уравнение (24) примет вид

$$m_1 m_{ep}(\ddot{y}_1 - \ddot{y}_{ep}) + (m_1 + m_{ep})c(y_1 - y_{ep}) = m_{ep} G_{ep}. \quad (26)$$

или

$$\left( \ddot{y}_1 - \ddot{y}_{ep} \right) + \frac{m_1 + m_{ep}}{m_1 m_{ep}} \cdot c(y_1 - y_{ep}) = \frac{G_{ep}}{m_1}. \quad (27)$$

Общее решение уравнения (27)

$$(y_1 - y_{ep}) = A \cos pt + B \sin pt + (y_1 - y_{ep})_s, \quad (28)$$

где  $p = \sqrt{\frac{m_1 + m_{ep}}{m_1 m_{ep}}} c u(y_1 - y_{ep})$ , – частное решение уравнения (27), которое равно

$$(y_1 - y_{ep})_s = \frac{G_{ep}}{m_1} \frac{(m_1 + m_{ep})c}{m_1 m_{ep}} = \frac{G_{ep} \cdot m_{ep}}{(m_1 + m_{ep})c}. \quad (29)$$

Учитывая (29), запишем уравнение (28)

$$(y_1 - y_{ep}) = A \cos pt + B \sin pt + \frac{G_{ep} \cdot m_{ep}}{(m_1 + m_{ep})c}, \quad (30)$$

Начальные условия при  $t_2 = 0; y_1 - y_{ep} = 0; \dot{y}_1 - \dot{y}_{ep} = (\dot{y}_1)_1$ , так как  $y_{ep} = 0$ . Примем, что скорость  $(\dot{y}_1)_1$  в начале «послеотрывной» стадии равна  $(\dot{y}_1)_0$ . Продифференцировав (30), найдем

$$\left( \dot{y}_1 - \dot{y}_{ep} \right) = -pA \sin pt + pB \cos pt. \quad (31)$$

Подставив из начальных условий  $y_1 - y_{ep} = 0$  в (30) и  $\dot{y}_1 - \dot{y}_{ep} = (\dot{y}_1)_0$  в (31) получим

$$A = -\frac{G_{ep} \cdot m_{ep}}{c(m_1 + m_{ep})}; \quad (32)$$

$$B = \frac{(\dot{y}_1)_0}{\sqrt{\frac{m_1 + m_{ep}}{m_1 m_{ep}} \cdot c}}. \quad (33)$$

Приняв во внимание значения А и В, из уравнения (30) найдем

$$(y_1 - y_{ep}) = \frac{G_{ep} \cdot m_{ep}}{c(m_1 + m_{ep})}(1 - \cos pt) + \frac{(\dot{y}_1)_0}{p} \sin pt, \quad (34)$$

Усилие в подъемных канатах после отрыва груза от основания

$$S_2 = G_{ep} + c(y_1 - y_{ep}) \quad (35)$$

и с учетом (34)

$$S_2 = G_{ep} - \frac{G_{ep} \cdot m_{ep}}{(m_1 + m_{ep})}(1 - \cos pt) + \frac{c \cdot (\dot{y}_1)_0}{p} \sin pt, \quad (36)$$

Для определения максимального усилия в подъемных канатах после отрыва груза от основания исследуем функцию  $S_2(t_2)$  на экстремум. Дифференцируя и приравнявая нулю уравнение (36) получим

$$\frac{G_{ep} \cdot m_{ep}}{m_1 + m_{ep}} p \sin pt_2 + c(y_1)_0 \cos pt_2 = 0. \quad (37)$$

Разделив обе части уравнения (37) на  $\cos pt_2$ , найдем

$$\operatorname{tg}(pt_2) = -\frac{c(y_1)_0}{p} \cdot \frac{(m_1 + m_{ep})}{G_{ep} \cdot m_{ep}}. \quad (38)$$

Учитывая периодичность функции тангенса, определим точку максимума функции  $S_2(t_2)$

$$pt_2 + \pi = \operatorname{arctg} \left[ -\frac{c(y_1)_0}{p} \cdot \frac{(m_1 + m_{ep})}{G_{ep} \cdot m_{ep}} \right]. \quad (39)$$

а, следовательно,

$$t_2 = -\frac{\operatorname{arctg} \left[ -\frac{c(y_1)_0}{p} \cdot \frac{(m_1 + m_{ep})}{G_{ep} \cdot m_{ep}} \right] + \pi}{p}. \quad (40)$$

Для удобства понимания и компактности подстановки значения  $t_2$  из (40) в выражение (36) подставим значение  $t_2$  вне выражения (36) в  $\cos pt_2$  и  $\sin pt_2$ , преобразовав, получим

$$\begin{aligned} \cos pt_2 &= -\cos \left\{ \operatorname{arctg} \left[ \frac{c(y_1)_0}{p} \cdot \frac{(m_1 + m_{ep})}{G_{ep} \cdot m_{ep}} \right] \right\}, \\ \sin pt_2 &= \sin \left\{ \operatorname{arctg} \left[ \frac{c(y_1)_0}{p} \cdot \frac{(m_1 + m_{ep})}{G_{ep} \cdot m_{ep}} \right] \right\}. \end{aligned} \quad (41)$$

Подставив значения  $\cos pt_2$  и  $\sin pt_2$  из (41) в выражение (36), найдем максимальное значение усилия в подъемных канатах после отрыва груза от основания

$$\begin{aligned} S_{2max} &= G_{ep} + \frac{G_{ep} \cdot m_{ep}}{m_1 + m_{ep}} \left\{ 1 + \cos \operatorname{arctg} \left[ \frac{c(y_1)_0}{p} \cdot \frac{(m_1 + m_{ep})}{G_{ep} \cdot m_{ep}} \right] \right\} + \\ &+ \frac{c \cdot (y_1)_0}{p} \sin \operatorname{arctg} \left[ \frac{c(y_1)_0}{p} \cdot \frac{(m_1 + m_{ep})}{G_{ep} \cdot m_{ep}} \right], \end{aligned} \quad (42)$$

Преобразовав выражение (42), учитывая, что

$$\cos \operatorname{arctg} \alpha = \frac{1}{\sqrt{1 + \alpha^2}}, \sin \operatorname{arctg} \alpha = \frac{\alpha}{\sqrt{1 + \alpha^2}} \quad (43)$$

получим в другом виде выражение для определения  $S_{2max}$ :

$$S_{2max} = G_{ep} + \frac{G_{ep} \cdot m_{ep}}{m_1 + m_{ep}} \left\{ 1 + \sqrt{1 + \left[ \frac{c(y_1)_0}{p} \cdot \frac{(m_1 + m_{ep})}{G_{ep} \cdot m_{ep}} \right]^2} \right\}, \quad (44)$$

или раскрыв  $p = \sqrt{c \cdot \frac{m_1 + m_{ep}}{m_1 m_{ep}}}$ , имеем

$$S_{2max} = G_{ep} + \frac{G_{ep} \cdot m_{ep}}{m_1 + m_{ep}} \left\{ 1 + \sqrt{1 + \frac{c \cdot m_1 (m_1 + m_{ep})}{m_{ep}} \left[ \frac{(y_1)_0}{G_{ep}} \right]^2} \right\}, \quad (45)$$

Тогда коэффициент динамичности для нагружения канатов определяется:

$$k_{дин} = 1 + \frac{m_{ep}}{m_1 + m_{ep}} \left\{ 1 + \sqrt{1 + \frac{c \cdot m_1 (m_1 + m_{ep})}{m_{ep}} \left[ \frac{(y_1)_0}{G_{ep}} \right]^2} \right\}, \quad (46)$$

С введением дополнительного упругого звена жесткость канатной подвески изменится и будет определяться по зависимости

$$c_n = \frac{c_k \cdot c_{дон}}{c_k + c_{дон}}, \quad (47)$$

где  $c_k$  – приведенная жесткость тяговых элементов;  $c_{дон}$  – жесткость дополнительного упругого звена.

Следовательно, приведенная жесткость несущей металлоконструкции и тяговых элементов

с учетом жесткости дополнительного упругого звена будет определяться

$$c = \frac{c_M \cdot c_k \cdot c_{дон}}{c_M \cdot c_k + c_M \cdot c_{дон} + c_k \cdot c_{дон}}. \quad (48)$$

Из зависимости (48) следует, что

$$c_{дон} = \frac{c_M \cdot c_k}{\frac{c_M \cdot c_k}{c} - c_M - c_k}. \quad (49)$$

Тогда определим зависимость  $c$  от  $k_{дин}$ . Преобразовав выражение (46), получим

$$c = \left[ \frac{(y_1)_0}{G_{ep}} \right]^2 \frac{k_{дин} - 1}{m_1} \left\{ (k_{дин} - 1) \frac{m_1 + m_{ep}}{m_{ep}} - 2 \right\}. \quad (50)$$

Подставив полученную зависимость (50) в (49), получим зависимость для определения жесткости дополнительного упругого звена:

$$c_{дон} = \frac{c_M \cdot c_k}{\left[ \frac{(y_1)_0}{G_{ep}} \right]^2 \frac{k_{дин} - 1}{m_1} \left\{ (k_{дин} - 1) \frac{m_1 + m_{ep}}{m_{ep}} - 2 \right\} - c_M - c_k}. \quad (51)$$

Таким образом, для каждого конкретного случая по формуле (51) можно определить значение жесткости дополнительного упругого звена, введение которого в силовую цепь механизма подъема позволит предотвратить систематические перегрузки крана, при этом действие указанного упругого элемента должно начинаться в момент отрыва груза от основания.

Для того, чтобы действие дополнительного упругого элемента начиналось в момент отрыва груза от основания, этот упругий элемент должен быть предварительно поджат на величину усилия, соответствующего номинальной грузоподъемности крана. При этом он должен иметь нелинейную характеристику жесткости: после отрыва груза от основания и начала действия дополнительного упругого элемента его жесткость должна уменьшаться. Обеспечить переменную жесткость дополнительного упругого элемента можно путем использования пружины с нелинейной характеристикой, например, тарельчатой пружины, либо выполнить его составным с применением пружины с постоянной жесткостью и передаточного механизма, передаточное число которого увеличивалось бы по мере перемещения подвижных деталей этого механизма после начала его срабатывания. Для этого можно использовать схему роликового передаточного механизма, рассмотренную в [8, с. 12–14].

#### Выводы:

1) обеспечить защиту грузоподъемных кранов мостового типа от систематических перегрузок можно путем введения в систему подвески груза дополнительного упругого звена;

2) дополнительное упругое звено должно быть предварительно поджато на величину усилия, соответствующего номинальной грузоподъемности крана;

3) дополнительное упругое звено должно иметь переменную жесткость, уменьшающуюся после начала его действия.

#### Список литературы:

1. Грузоподъемные машины / М.П. Александров, Л.Н. Колобов, Н.А. Лобов и др. Москва: Машиностроение, 1986. 400 с.
2. Грузоподъемные краны промышленных предприятий: справочник / И.И. Абрамович, В.Н. Березин, А.Г. Яуре. Москва: Машиностроение, 1989. 360 с.
3. Комаров М.С. Динамика грузоподъемных машин. Киев-Москва: Машгиз, 1953. 188 с.
4. Шеффлер М., Пайер Г., Курт Ф. Основы расчета и конструирования подъемно-транспортных машин: Сокр. Пер. с нем. Москва: Машиностроение, 1980. 255 с.
5. Лобов Н.А. Динамика грузоподъемных кранов. Москва: Машиностроение, 1987. 160 с.
6. Орлов Д.Ю. Повышение безопасности эксплуатации кранов мостового типа на основе ограничителя грузоподъемности с расширенными функциональными возможностями: автореферат дис. ... канд. техн. наук. Томск, 2004. 20 с.
7. Столяров Д.П. Совершенствование системы защиты и контроля технического состояния крана мостового типа: автореферат дис. ... канд. техн. наук. Томск, 2010. 22 с.
8. Семенюк В.Ф., Лингур В.Н. Способ и устройство для повышения точности защиты от перегрузки кранов мостового типа. Подъемные сооружения, специальная техника. 2017. № 12. С. 12–14.

#### ОБҐРУНТУВАННЯ МОЖЛИВОСТІ ЗАХИСТУ ВАНТАЖОПІДЙОМНИХ КРАНІВ МОСТОВОГО ТИПУ ВІД СИСТЕМАТИЧНИХ ПЕРЕВАНТАЖЕНЬ

*У статті обґрунтовано необхідність захисту кранів мостового типу від систематичних перевантажень. Отримано аналітичні залежності для визначення динамічних навантажень, що виникають у підйомних канатах, під час підйому вантажу. Визначено жорсткість додаткової пружної ланки, введення якої в силовий ланцюг механізму підйому дозволяє запобігти систематичному перевантаженню крана. Сформульовано вимоги до конструкції додаткової пружної ланки. Дано рекомендації для створення конструкції додаткової пружної ланки.*

**Ключові слова:** кран мостового типу, систематичні перевантаження, додаткова пружна ланка, динамічні навантаження, жорсткість додаткової пружної ланки.

#### SUBSTANTIATION OF POSSIBILITIES TO PROTECT THE BRIDGE TYPE HOISTING CRANES AGAINST SYSTEMATIC OVERLOADS

*The necessity of bridge type cranes protection against systematic overloads is substantiated. Obtained are analytical dependencies for determining the dynamic loads in lifting ropes, when load hoisting. Determined is the desired rigidity of an additional elastic link introduced into the lifting mechanism power chain to prevent systematic overloading of the crane. Formulated are the requirements for the additional elastic link design. Recommendations are given for creating the additional elastic link structure.*

**Key words:** bridge type crane, systematic overload, additional elastic link, dynamic loads rigidity of additional elastic link.



УДК 693.542

**Чайка Д.О.**

Харківський національний університет будівництва й архітектури

## ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТЕЙ ТРАНСПОРТУВАННЯ БЕТОННОЇ СУМІШІ УНІВЕРСАЛЬНИМ ШЛАНГОВИМ БЕТОНОНАСОСОМ

У статті представлено дослідження параметрів транспортування бетонної суміші універсальним шланговим бетононасосом. Представлено дослідження роботи шлангового бетононасоса під час усмоктування бетонної суміші з бункера та приведена умова його працездатності. У процесі нагнітання розглядаються випадки подання сумішею різної рухомості горизонтальним або вертикальним трубопроводом. Отримано рівняння для визначення висоти та дальності подання бетонної суміші універсальним шланговим бетононасосом. За допомогою проведених досліджень встановлено максимальні можливості транспортування сумішею шланговим бетононасосом.

**Ключові слова:** універсальний шланговий бетононасос, транспортування бетонної суміші, умова працездатності, тиск нагнітання, рухливість бетонної суміші.

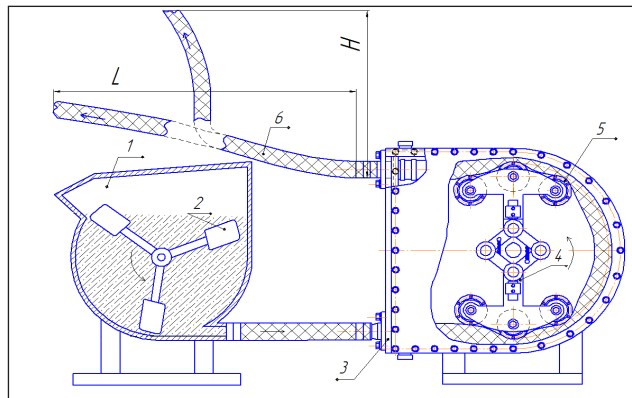
**Постановка проблеми.** Під час будівництва будівель та споруд в умовах будівельних майданчиків широке застосування має монолітне бетонування. Просування технологій та великі обсяги бетонних робіт потребують створення та дослідження нового обладнання для виконання таких робіт. Під час зведення об'єктів будівництва ефективно можуть використовуватися безпоршневі шлангові бетононасоси з гідравлічним приводом, які за однією і тією ж продуктивністю мають такі переваги [1]: спрощена принципова схема машини; знижена металоємність та енерговитрати; компактність конструктивного рішення та малі витрати часу на їх обслуговування.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У роботі [2] розглядаються результати аналітичних досліджень таких основних параметрів шлангового насоса, як продуктивність, потужність, ККД, та аналізується ресурс його роботи. Але в цій роботі не досліджуються можливості транспортування суміші шланговим насосом. У статті [3] розглядаються технічні можливості перистальтичного насоса. Аналізуються його гідравлічні характеристики: подача, диференційний напір, перепад тиску, необхідний для транспортування суміші, що перекачується, та робота притискних роликів. Проте в роботі не досліджується процес транспортування бетонної суміші. Транспортування сумішею за допомогою бетононасосів розглядаються в роботах [4; 5], але параметри бетононасоса під час транспортування бетонної суміші не досліджуються.

**Постановка завдання.** Метою дослідження є визначення можливостей транспортування бетон-

них сумішею різної рухомості новим універсальним шланговим бетононасосом.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Універсальний безпоршневі шланговий бетононасос із гідравлічним приводом (рис. 1), що досліджується, розроблено на кафедрі механізації будівельних процесів Харківського національного університету будівництва та архітектури і запатентовано в Україні [6].



**Рис. 1.** Принципова схема універсального безпоршневого шлангового розчинобетононасоса із гідравлічним приводом

- 1 – завантажувальний бункер; 2 – змішувач-збуджувач; 3 – корпус бетононасоса; 4 – ротор; 5 – прижимні ролики; 6 – гнучкий транспортуючий шланг.

На початку роботи шлангового бетононасоса бетонна суміш з бункера всмоктується в робочу частину шланга в корпусі насоса. Для працездатності шлангового бетононасоса та стабільної його роботи бетонна суміш повинна повністю заповнювати обсяг ділянки всмоктування  $L_{вс}$ , що має місце між бункером та точкою деформації робочої частини шланга притискним роликом (рис. 2).

Параметри бетонної суміші

Рухливість бетонної суміші П, см	Динамічна в'язкість бетонної суміші, $\mu$ , Па·с	Кінематична в'язкість бетонної суміші, $\nu$ , м <sup>2</sup> /с	Число Рейнольдса, $Re$		
			при Птехн, м <sup>3</sup> /г		
			5	10	15
6	0,65	$2,95 \times 10^{-4}$	97	200	376
8	0,5	$2,27 \times 10^{-4}$	118	260	488
10	0,35	$1,59 \times 10^{-4}$	169	370	697

\* Динамічна в'язкість бетонної суміші прийнята на основі проведених досліджень [9; 10]

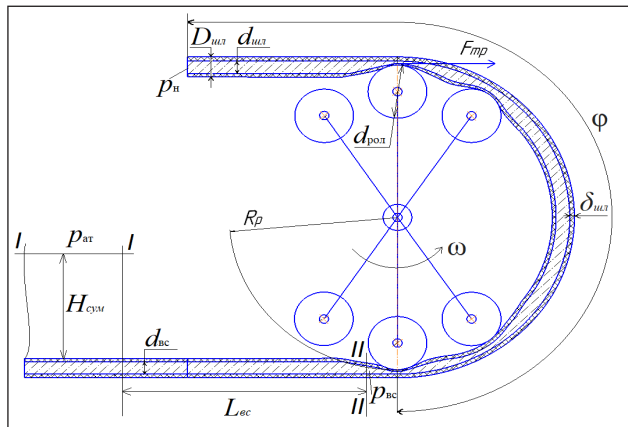


Рис. 2. Розрахункова схема для визначення працездатності шлангового бетононасоса та тиску, що він створює для нагнітання бетонної суміші

Рівняння Бернуллі, щодо перетинів I-I, II-II, яке, нехтуючи швидкістю руху бетонної суміші в перетині I-I, може бути записано у вигляді:

$$H_{\text{сум}} = \frac{p_{\text{сум}} - p_{\text{ат}}}{\rho_0 g} + (1 + \zeta_{\Sigma}) \frac{v_{\text{сум}}^2}{2g} \quad (1)$$

де  $H_{\text{сум}}$  – висота бетонної суміші в бункері, м;  $p_{\text{вс}}$  і  $p_{\text{ат}}$  – відповідно тиск всмоктування за притискним роликом та атмосферний тиск, Па;  $\rho_0$  – середня щільність бетонної суміші, кг/м<sup>3</sup>;  $\zeta_{\Sigma}$  – сумарна втрата тиску під час усмоктування бетонної суміші;  $v_{\text{сум}}$  – швидкість руху суміші по трубопроводу на ділянці  $L_{\text{вс}}$ , м/с,  $v_{\text{сум}} = 2\pi n R_p$ , де  $R_p$  – радіус ротора бетононасоса по торцю ролика.

Сумарна втрата тиску під час усмоктування бетонної суміші визначається як:

$$\zeta_{\Sigma} = \zeta_{\text{вх}} + \zeta_{\text{тр}} \quad (2)$$

де  $\zeta_{\text{вх}}$  – коефіцієнт опору при вході бетонної суміші у всмоктуючий патрубок [7];  $\zeta_{\text{тр}}$  – коефіцієнт опору на тертя під час переміщення бетонної суміші по всмоктуючому патрубку:

$$\zeta_{\text{тр}} = \lambda \frac{L_{\text{вс}}}{d_{\text{вс}}} \quad (3)$$

де  $L_{\text{вс}}$  і  $d_{\text{вс}}$  – відповідно довжина ділянки всмоктування від бункера бетононасоса до притискного ролика і її внутрішній діаметр, м;  $\lambda$  –

коефіцієнт опору руху бетонної суміші по трубопроводу.

Коефіцієнт опору руху бетонної суміші по трубопроводу визначається за умов, що в трубопроводі спостерігається ламінарна течія бетонної суміші. Для трубопроводів у розрахунках приймається [8]:

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (4)$$

де  $Re$  – число Рейнольдса.

$$Re = \frac{v_{\text{сум}} \cdot d_{\text{вс}}}{\nu} \quad (5)$$

де  $\nu$  – кінематична в'язкість бетонної суміші (табл. 1).

Тиск усмоктування бетонної суміші з бункера бетононасоса може бути визначений із формули (1):

$$p_{\text{вс}} = \rho_0 g H_{\text{сум}} + p_{\text{ат}} - (1 + \zeta_{\Sigma}) \rho_0 \frac{v_{\text{сум}}^2}{2} \quad (6)$$

Для повного заповнення ділянки всмоктування бетонною сумішшю, тобто працездатності безпоршневого бетононасоса повинна виконуватися умова:

$$\rho_0 g H_{\text{сум}} + p_{\text{ат}} \geq (1 + \zeta_{\Sigma}) \rho_0 \frac{v_{\text{сум}}^2}{2} \quad (7)$$

Відстань, на яку може транспортувати бетонну суміш універсальний шланговий бетононасос, залежить від його продуктивності, тиску нагнітання, який здатен створити бетононасос, та властивостей суміші, що перекачується.

Тиск нагнітання, який повинен створити насос для перекачування суміші, буде визначатися в межах кута  $\phi$  (робочої зони насоса) та з урахуванням діючих сил тертя в процесі нагнітання бетонної суміші:

$$p_{\text{н}} = \frac{4 \cdot m \cdot \omega^2 \cdot R_p \cdot \phi \cdot f}{\pi (D_{\text{шл}} - 2\delta_{\text{шл}})^2} \quad (8)$$

де  $m$  – маса ротора, що перетискає гнучкий шланг в корпусі насоса;  $\omega$  – кутова швидкість ротора бетононасоса;  $R_p$  – радіус ротора бетононасоса по торцю ролика;  $\phi$  – зона робочого процесу нагнітання бетонної суміші, рад;  $f$  – коефіцієнт тертя бетонної суміші по внутрішній стінці робочого шланга в корпусі насоса;  $D_{\text{шл}}$  – зовнішній діаметр гнучкого шланга;  $\delta_{\text{шл}}$  – товщина стінки шланга.

**Можливості транспортування бетонної суміші універсальним шланговим бетононасосом по горизонтальному трубопроводу при  $P_{техн} = 5 \text{ м}^3/\text{г}$**

L, м	$P_{техн} = 5 \text{ м}^3/\text{г}$						H, м	$P_{техн} = 5 \text{ м}^3/\text{г}$					
	П, см							П, см					
	6		8		10			6		8		10	
	$p_n$ , МПа	$\Delta p_L$ , МПа	$p_n$ , МПа	$\Delta p_L$ , МПа	$p_n$ , МПа	$\Delta p_L$ , МПа		$p_n$ , МПа	$\Delta p_H$ , МПа	$p_n$ , МПа	$\Delta p_H$ , МПа	$p_n$ , МПа	$\Delta p_H$ , МПа
0	0,56	-	0,56	-	0,56	-	0	0,56	-	0,56	-	0,56	-
1	0,57	0,02	0,57	0,01	0,57	0,01	1	0,60	0,04	0,60	0,04	0,59	0,03
5	0,64	0,09	0,63	0,07	0,61	0,05	5	0,76	0,21	0,75	0,19	0,73	0,17
10	0,73	0,17	0,70	0,14	0,66	0,10	10	0,97	0,41	0,94	0,38	0,89	0,34
20	0,91	0,35	0,84	0,28	0,76	0,20	15	1,17	0,62	1,13	0,57	1,06	0,50
30	1,08	0,52	0,99	0,43	0,86	0,30	20	1,38	0,82	1,32	0,76	1,23	0,67
40	1,26	0,70	1,13	0,57	0,96	0,40	25	1,58	1,03	1,50	0,95	1,40	0,84
50	1,43	0,87	1,27	0,72	1,06	0,50	27	-	-	1,58	1,02	1,46	0,91
60	1,60	1,04	1,42	0,86	1,16	0,60	31	-	-	-	-	1,60	1,04
72	-	-	1,59	1,03	1,26	0,70	* Сірим кольором позначені максимально можливі відстані транспортування суміші універсальним шланговим бетононасосом.						
80	-	-	-	-	1,36	0,80							
90	-	-	-	-	1,46	0,90							
104	-	-	-	-	1,60	1,04							

Під час транспортування бетонної суміші на певну відстань тиск нагнітання, який повинен створити шланговий бетононасос, буде визначатися з урахуванням перепаду тиску, що створюється за рахунок діючих сил тертя та гідравлічного опору в транспортній магістралі, по якій рухається бетонна суміш.

$$p_{nL} = p_n + \Delta p_L \quad (9)$$

де  $p_n$  – тиск, який створює бетононасос для перекачування бетонної суміші;  $\Delta p_L$  – перепад тиску який створюється під час транспортування на довжину  $L$  за рахунок гідравлічного опору суміші, що транспортується.

Перепад тиску в транспортній магістралі, по якій рухається бетонна суміш в горизонтальному напрямку, визначається з урахуванням властивостей бетонної суміші (табл. 1) та параметрів транспортної магістралі [8]:

$$\Delta p_L = \lambda \cdot \frac{L}{d_{mp}} \cdot \rho_0 \cdot \frac{v_{cp}^2}{2} \quad (10)$$

де  $L$  – довжина трубопроводу по якому транспортується бетонна суміш;  $d_{mp}$  – внутрішній діаметр транспортного трубопроводу;  $\rho_0$  – середня щільність бетонної суміші;  $v_{cp}$  – середня швидкість, із якою транспортується бетонна суміш.

У кінцевому вигляді залежність тиску нагнітання під час подання бетонної суміші по горизонтальному трубопроводу має вигляд:

$$p_{nL} = \left( \frac{4 \cdot m \cdot \omega^2 \cdot R_p \cdot \varphi \cdot f}{\pi(D_{вл} - 2\delta_{вл})^2} \right) + \left( \lambda \cdot \frac{L}{d_{mp}} \cdot \rho_0 \cdot \frac{v_{cp}^2}{2} \right) \quad (11)$$

Під час подання бетонної суміші на висоту по вертикальному трубопроводу тиск нагнітання, який повинен створити універсальній шланговий бетононасос, може бути знайдено відповідно до залежності:

$$p_{nH} = p_n + \Delta p_H \quad (12)$$

де  $\Delta p_H$  – перепад тиску, який створюється під час подання бетонної суміші на висоту  $H$  за рахунок її ваги та гідравлічного опору під час транспортування.

Перепад тиску в транспортній магістралі, по якій подається бетонна суміш в вертикальному напрямку, визначається з урахуванням властивостей бетонної суміші (табл. 1), параметрів транспортної магістралі та ваги стовпа суміші, що підіймається:

$$\Delta p_H = \left( \lambda \cdot \frac{H}{d_{mp}} \cdot \rho_0 \cdot \frac{v_{cp}^2}{2} \right) + \left( \frac{m_{cm} \cdot g}{S_{mp}} \right) \quad (13)$$

де  $m_{cm}$  – маса стовпа бетонної суміші, що подається;  $g$  – прискорення вільного падіння;  $S_{mp}$  – площа поперечного перерізу транспортного трубопроводу.

У кінцевому вигляді залежність тиску нагнітання при подачі бетонної суміші в вертикальному напрямку має вигляд:

$$p_{nH} = \left( \frac{4 \cdot m \cdot \omega^2 \cdot R_p \cdot \varphi \cdot f}{\pi(D_{вл} - 2\delta_{вл})^2} \right) + \left( \left( \lambda \cdot \frac{H}{d_{mp}} \cdot \rho_0 \cdot \frac{v_{cp}^2}{2} \right) + \left( \frac{m_{cm} \cdot g}{S_{mp}} \right) \right) \quad (14)$$

За допомогою програмного комплексу MathCad проведені дослідження можливостей транспортування бетонної суміші універсальним шланговим

бетононасосом по горизонтальному та вертикальному трубопроводах (табл. 2 – 4).

Під час досліджень прийняті такі допущення: транспортна магістраль має абсолютний горизонт та не має жодного повороту на 90°; максимально допустимий тиск в робочій частині шланга не перевищує 1,6 МПа, відповідно до технічних характеристик перистальтичних шлангів [11].

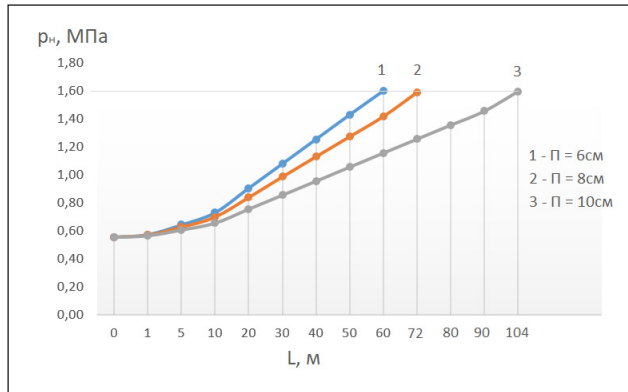


Рис. 3. Залежності тиску нагнітання бетонної суміші універсальним шланговим бетононасосом від довжини транспортної магістралі при  $P_{\text{техн}} = 5 \text{ м}^3/\text{г}$

Графічні залежності на рис. 3 дозволяють визначити максимальні можливості транспортування бетонної суміші по горизонтальному трубопроводу універсальним шланговим бетононасосом при його продуктивності  $P_{\text{техн}} = 5 \text{ м}^3/\text{г}$ . Залежність 1 (рис. 3) показує, що під час рухливості бетонної суміші  $\Pi = 6 \text{ см}$  максимальна дальність транспортування 60 м. При рухливості  $\Pi = 8 \text{ см}$  (залежність 2) бетононасос може транспортувати бетонну суміш на відстань до 72 м. Залежність 3 показує, що максимально можлива дальність транспортування суміші при її рухливості  $\Pi = 10 \text{ см}$  – 104 м.

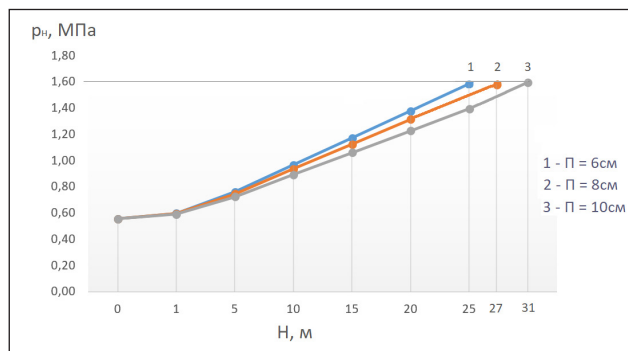


Рис. 4. Залежності тиску нагнітання від висоти подачі бетонної суміші універсальним шланговим бетононасосом при  $P_{\text{техн}} = 5 \text{ м}^3/\text{г}$

Графічні залежності на рис. 4 дозволяють визначити максимальні можливості подання бетонної суміші по вертикалі безпоршневим бетононасосом

при його продуктивності  $P_{\text{техн}} = 5 \text{ м}^3/\text{г}$ . Залежність 1 (рис. 4) показує, що при рухливості бетонної суміші  $\Pi = 6 \text{ см}$  максимальна висота її подачі становить 25 м. При рухливості  $\Pi = 8 \text{ см}$  (залежність 2) універсальний безпоршневий бетононасос може подавати бетонну суміш на висоту до 27 м. Залежність 3 показує, що максимально можлива висота подачі суміші бетононасосом при її рухливості  $\Pi = 10 \text{ см}$  – 31 м.

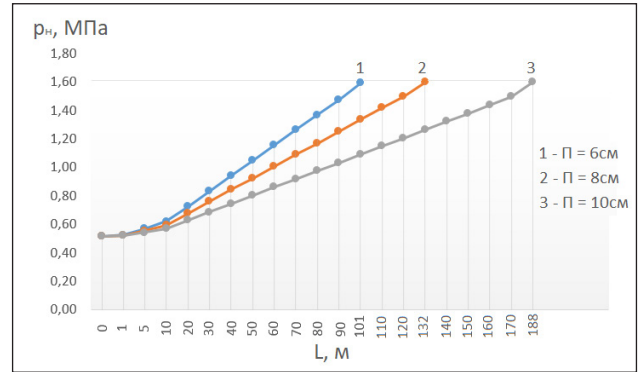


Рис. 5. Залежності тиску нагнітання бетонної суміші універсальним шланговим бетононасосом від довжини транспортної магістралі при  $P_{\text{техн}} = 10 \text{ м}^3/\text{г}$

Аналіз графічних залежностей (рис. 5) дозволяє визначити максимальні можливості транспортування бетонної суміші по горизонтальному трубопроводу універсальним шланговим бетононасосом при його продуктивності  $P_{\text{техн}} = 10 \text{ м}^3/\text{г}$ . Залежність 1 (рис. 5) свідчить про можливість транспортування бетонної суміші до 101 м, при її рухливості  $\Pi = 6 \text{ см}$ . При рухливості  $\Pi = 8 \text{ см}$  (залежність 2) бетононасос може транспортувати бетонну суміш на відстань до 132 м. Максимально можлива дальність транспортування суміші при її рухливості  $\Pi = 10 \text{ см}$  – 188 м (залежність 3).

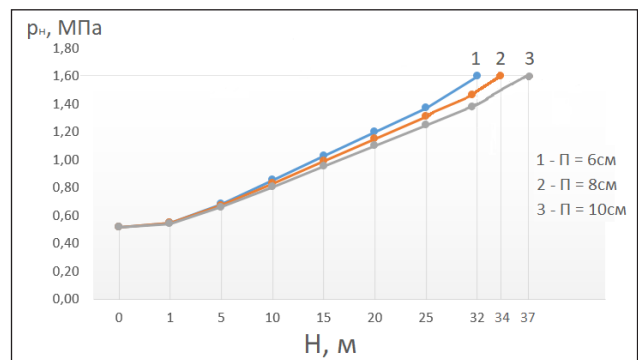


Рис. 6. Залежності тиску нагнітання від висоти подачі бетонної суміші універсальним шланговим бетононасосом при  $P_{\text{техн}} = 10 \text{ м}^3/\text{г}$

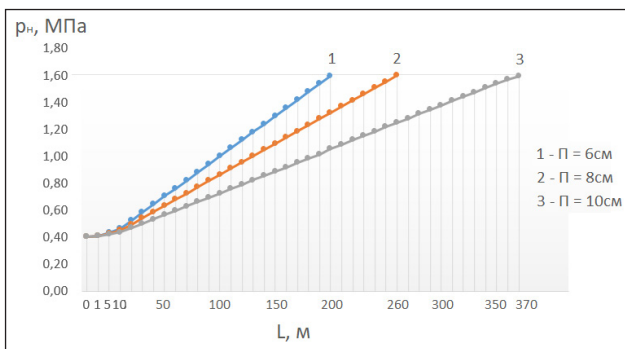
Аналіз залежностей на рис. 6 дозволяє визначити максимальні можливості подачі бетонної суміші по вертикалі безпоршневим бетононасосом при його

**Можливості транспортування бетонної суміші універсальним шланговим бетононасосом по горизонтальному трубопроводу при  $\Pi_{\text{техн}} = 10 \text{ м}^3/\text{г}$**

L, м	$\Pi_{\text{техн}} = 10 \text{ м}^3/\text{г}$						H, м	$\Pi_{\text{техн}} = 10 \text{ м}^3/\text{г}$					
	$\Pi$ , см							$\Pi$ , см					
	6		8		10			6		8		10	
	$r_{\text{н}}$ , МПа	$\Delta p_L$ , МПа	$r_{\text{н}}$ , МПа	$\Delta p_L$ , МПа	$r_{\text{н}}$ , МПа	$\Delta p_L$ , МПа		$r_{\text{н}}$ , МПа	$\Delta p_H$ , МПа	$r_{\text{н}}$ , МПа	$\Delta p_H$ , МПа	$r_{\text{н}}$ , МПа	$\Delta p_H$ , МПа
0	0,51	-	0,51	-	0,51	-	0	0,51	-	0,51	-	0,51	-
1	0,52	0,01	0,52	0,01	0,52	0,01	1	0,55	0,03	0,55	0,03	0,54	0,03
5	0,57	0,05	0,55	0,04	0,54	0,03	5	0,68	0,17	0,67	0,16	0,66	0,15
10	0,62	0,11	0,60	0,08	0,57	0,06	10	0,86	0,34	0,83	0,32	0,81	0,29
20	0,73	0,21	0,68	0,17	0,63	0,12	15	1,03	0,51	0,99	0,48	0,95	0,44
30	0,83	0,32	0,76	0,25	0,69	0,17	20	1,20	0,69	1,15	0,64	1,10	0,59
40	0,94	0,43	0,84	0,33	0,74	0,23	25	1,37	0,86	1,31	0,79	1,25	0,73
50	1,05	0,54	0,92	0,41	0,80	0,29	30	1,54	1,03	1,47	0,95	1,39	0,88
60	1,16	0,64	1,01	0,49	0,86	0,35	32	1,60	1,09	1,53	1,02	1,45	0,94
70	1,26	0,75	1,09	0,58	0,92	0,41	34	-	-	1,59	1,08	1,51	1,0
80	1,37	0,86	1,17	0,66	0,98	0,46	37	-	-	-	-	1,60	1,09
90	1,48	0,96	1,25	0,74	1,03	0,52							
101	1,59	1,08	1,34	0,82	1,09	0,58							
110	-	-	1,42	0,90	1,15	0,64							
120	-	-	1,50	0,99	1,21	0,69							
132	-	-	1,60	1,09	1,26	0,75							
140	-	-	-	-	1,32	0,81							
150	-	-	-	-	1,38	0,87							
160	-	-	-	-	1,44	0,92							
170	-	-	-	-	1,50	0,98							
188	-	-	-	-	1,60	1,09							

\* Сірим кольором позначені максимально можливі відстані транспортування суміші універсальним шланговим бетононасосом.

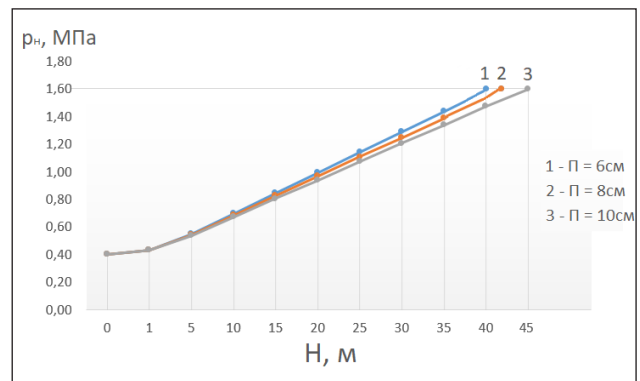
продуктивності  $\Pi_{\text{техн}} = 10 \text{ м}^3/\text{г}$ . Із залежності 1 (рис. 6) видно, що при рухливості бетонної суміші  $\Pi = 6 \text{ см}$  максимальна висота її подачі 32 м. При рухливості  $\Pi = 8 \text{ см}$  (залежність 2) безпоршневий бетононасос може подавати бетонну суміш на висоту до 34 м. При рухливості  $\Pi = 10 \text{ см}$  (залежність 3) максимально можлива висота подачі суміші бетононасосом 37 м.



**Рис. 7.** Залежності тиску нагнітання бетонної суміші універсальним шланговим бетононасосом від довжини транспортної магістралі при  $\Pi_{\text{техн}} = 15 \text{ м}^3/\text{г}$

Аналіз залежності 1 (рис. 7) показує, що при рухливості бетонної суміші  $\Pi = 6 \text{ см}$  мак-

симальна дальність її транспортування універсальним шланговим бетононасосом при його продуктивності  $\Pi_{\text{техн}} = 15 \text{ м}^3/\text{г} - 200 \text{ м}$ . При рухливості суміші  $\Pi = 8 \text{ см}$  (залежність 2) бетононасос може транспортувати бетонну суміш на відстань до 260 м. Залежність 3 дозволяє визначити максимально можливу дальність транспортування суміші при її рухливості  $\Pi = 10 \text{ см}$ , яка становить 370 м.



**Рис. 8.** Залежності тиску нагнітання від висоти подачі бетонної суміші універсальним шланговим бетононасосом при  $\Pi_{\text{техн}} = 15 \text{ м}^3/\text{г}$

**Можливості транспортування бетонної суміші універсальним шланговим бетононасосом по горизонтальному трубопроводу при  $\Pi_{\text{техн}} = 15 \text{ м}^3/\text{г}$**

L, м	$\Pi_{\text{техн}} = 15 \text{ м}^3/\text{г}$						H, м	$\Pi_{\text{техн}} = 15 \text{ м}^3/\text{г}$					
	П, см							П, см					
	6		8		10			6		8		10	
	рн, МПа	$\Delta pL$ , МПа	рн, МПа	$\Delta pL$ , МПа	рн, МПа	$\Delta pL$ , МПа		рн, МПа	$\Delta pH$ , МПа	рн, МПа	$\Delta pH$ , МПа	рн, МПа	$\Delta pH$ , МПа
0	0,41	-	0,41	-	0,41	-	0	0,41	-	0,41	-	0,41	-
1	0,41	0,01	0,41	0,00	0,41	0,00	1	0,44	0,03	0,43	0,03	0,43	0,03
5	0,44	0,03	0,43	0,02	0,42	0,02	5	0,55	0,15	0,55	0,16	0,54	0,13
10	0,47	0,06	0,45	0,05	0,44	0,03	10	0,70	0,30	0,69	0,32	0,67	0,27
20	0,53	0,12	0,50	0,09	0,47	0,06	15	0,85	0,44	0,83	0,48	0,81	0,40
40	0,64	0,24	0,59	0,18	0,53	0,13	20	1,00	0,59	0,97	0,64	0,94	0,54
60	0,76	0,36	0,68	0,28	0,60	0,19	25	1,14	0,74	1,11	0,79	1,07	0,67
80	0,88	0,48	0,77	0,37	0,66	0,26	30	1,29	0,89	1,25	0,95	1,21	0,80
100	1,00	0,60	0,87	0,46	0,73	0,32	35	1,44	1,03	1,39	1,02	1,34	0,94
120	1,12	0,72	0,96	0,55	0,79	0,39	40	1,59	1,18	1,53	1,12	1,48	1,07
140	1,24	0,84	1,05	0,64	0,86	0,45	42	-	-	1,59	1,18	1,53	1,12
160	1,36	0,95	1,14	0,74	0,92	0,52	45	-	-	-	-	1,60	1,20
180	1,48	1,07	1,23	0,83	0,99	0,58	* Сірим кольором позначені максимально можливі відстані транспортування суміші універсальним шланговим бетононасосом.						
200	1,60	1,19	1,33	0,92	1,06	0,65							
220	-	-	1,42	1,01	1,12	0,72							
240	-	-	1,51	1,10	1,19	0,78							
260	-	-	1,60	1,20	1,25	0,85							
280	-	-	-	-	1,31	0,91							
300	-	-	-	-	1,38	0,97							
320	-	-	-	-	1,44	1,04							
340	-	-	-	-	1,51	1,10							
370	-	-	-	-	1,60	1,19							

Графічні залежності на рис. 8 дозволяють визначити максимальні можливості подачі бетонної суміші по вертикальному трубопроводу шланговим бетононасосом при його продуктивності  $\Pi_{\text{техн}} = 15 \text{ м}^3/\text{г}$ . Залежність 1 показує, що при рухливості бетонної суміші  $\Pi = 6 \text{ см}$  максимальна висота її подачі 40 м. При рухливості  $\Pi = 8 \text{ см}$  (залежність 2) бетононасос може подавати бетонну суміш на висоту до 42 м. Залежність 3 показує, що максимально можлива висота подачі суміші універсальним шланговим бетононасосом при її рухливості  $\Pi = 10 \text{ см}$  – 45 м.

#### Висновки:

- 1) наведено принципову схему універсального шлангового бетононасоса з гідравлічним приводом;
- 2) представлено дослідження роботи шлангового бетононасоса під час всмоктування бетонної суміші з бункера та приведена умова його працездатності;
- 3) отримано методику визначення можливостей транспортування бетонної суміші універсальним шланговим бетононасосом по горизонтальному та вертикальному трубопроводах з урахуванням параметрів суміші, що транспортується.

#### Список літератури:

1. Daszczenko, A. *Hydraulika: Maszyny hydrauliczne* / A. Daszczenko, J. Glinski, E. Krasowski et al. Lublin: Polska Akademia Nauk Oddzial w Lublinie, 2010. 385 p.
2. Михеев А.Ю. Исследование характеристики и повышение надежности насосов перистальтического принципа действия: дис. ... канд. техн. наук. Уфа, 2004. 168 с.
3. Кускова М.А. Гидравлические характеристики перистальтических насосов. *Нефтяное хозяйство*. 2008. №. 1. С. 104–106.
4. J. Henikl, W. Kemmettmiller, A. Kugi. Estimation and control of the tool center point of a mobile concrete pump. *Automation in Construction*. 2016. Vol.61. P. 112–123.

5. József klespitz, levente kovács. Peristaltic pumps – a review on working and control possibilities/ SAMI 2014, IEEE 12th international symposium on applied machine intelligence and informatics. January 23–25, 2014. Herl'any, Slovakia, p. 191–194.
6. Універсальний шланговий бетононасос: пат. 112585 Україна. МПК: F04B 15/02, F04B 43/12. а 201413692; заявл. 22.12.14; опубл. 26.09.16, Бюл. № 18. 4 с.
7. Приходько О.А., Сьомін Д.О. Технічна аерогідромеханіка: навч. посіб. Луганськ: СНУ ім. В. Даля, 2002. 170 с.
8. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. – М.: Машиностроение, 1975. 559 с.
9. Меленцов Н.А. Создание растворобетононасоса с повышенной пропускной способностью клапанных узлов и стабильной подачей бетонных смесей: дисс... канд. техн. наук: 05.05.02. Харьков, 2014. 176 с.
10. Способ отверждения бетона: пат. 2615545 Франция. C04B41/63, опубл. 2017.
11. Bredel hoses. URL: <http://www.watson-marlow.com/us-en/range/bredel/hose-elements>

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ БЕТОННЫХ СМЕСЕЙ УНИВЕРСАЛЬНЫМ ШЛАНГОВЫМ БЕТОНОНАСОСОМ**

*В статье представлены исследования параметров транспортирования бетонной смеси универсальным шланговым бетононасосом. Представлены исследования работы шлангового бетононасоса при всасывании бетонной смеси из бункера и приведено условие его работоспособности. В процессе нагнетания рассматриваются случаи подачи смесей различной подвижности по горизонтальному или вертикальному трубопроводу. Полученные уравнения для определения высоты и дальности подачи бетонной смеси универсальным шланговым бетононасосом. С помощью проведенных исследований установлены максимальные возможности транспортирования смесей шланговым бетононасосом.*

**Ключевые слова:** универсальный шланговый бетононасос, транспортирование бетонной смеси, условие работоспособности, давление нагнетания, подвижность бетонной смеси.

### **INVESTIGATION OF THE POSSIBILITIES OF TRANSPORTATION OF CONCRETE MIXTURE BY UNIVERSAL HOSE CONCRETE PUMP**

*The article presents the study of the parameters of transportation of concrete mix with a universal hose concrete pump. The research of the work of the hose concrete pump during the absorption of the concrete mixture from the bunker is presented and the condition of its efficiency is given. In the process of injection, instances of the feeding of mixtures of various displacements by horizontal or vertical pipelines are considered. The obtained equations for determining the height and range of supply of concrete mix with a universal hose concrete pump. With the help of the conducted researches the maximum possibilities of transportation of mixtures with the hose concrete pump are established.*

**Key words:** universal hose concrete pump, transportation of concrete mix, condition of performance, injection pressure, mobility of concrete mix.

## КОРАБЛЕБУДУВАННЯ

УДК 629.5

*Бондаренко А.Г.*

Приазовський державний технічний університет

### ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ БАРЖ ІЗ ПЕРЕВЕЗЕННЯ ДОВГИХ РЕЙОК

*У статті запропоновано здійснення вибору параметрів судна від басейну плавання з метою утворення флоту для технологічних перевезень. Поліпшення умов перевезень шляхом розгалуження транспортної інфраструктури. Розбудова причалів у гирлі річки. Використання причалів для загального доступу власників вантажу. Правове узгодження використання місць вантаження.*

**Ключові слова:** баржа для рейок, причали загального призначення, очищення небезпечної зони, лебідка судна, ротація фронтів навантаження.

**Постановка проблеми.** Обставини, які склалися у Приазов'ї, вказують на спорідненість причин, що їм передували. Подібні ситуації бачимо й у вугільній, хімічній промисловості, сільському господарстві – монопольний випуск продукції. Теодор Рузвельт говорив: «Або ми поборемо монополію, або буде революція». Становлення нафтобудування, промислового будівництва, металургійної промисловості призвело до дефолту економіки найсильнішої держави вік тому.

Заснування правового ґрунту для відновлення життєздатного суспільства торкається й Маріуполя. Підприємства транспортної машинобудівної, металургійної галузі працюють із таким напруженням, що не здатні підтримувати безпечні умови навколишнього середовища. Пропозиції щодо зміни продукції – рейок – на більш сучасні з більшою довжиною й більш міцні через мільярдні вкладення й великі ризики видаються власникам фантастичними.

Однак починання модернізації знаходять підтримку мерії, налагоджується транспортна інфраструктура, запущено завод із виробництва асфальту, у комунальну власність передані території аеропорту, заплави річок, активно ведеться децентралізація житлово-комунальних підприємств.

Для утримання територій, залучення до сільської господарської діяльності потрібно здійснювати очищення від вибухових об'єктів небезпечних зон, якими кишать прилеглі до міста землі, села, колишні дитячі табори. Транспортні проходи зачищено фірмою Halo Trust, яка поряд з ОБСЄ виконує свою місію й знешкоджує протипіхотні міни, розтяжки.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Судноплавство в сучасний період в Азовському морі обмежено [1], за версією росіян, для підтримки безпеки. Національним флотом перевозять близько 5% вантажів [2], що обробляють в українських портах. Завантаженість суднобудівних і судноремонтних заводів становить чверть від їх потужностей [3].

Поряд із вирішенням тактичних завдань необхідне й вироблення стратегій напряму поліпшення передусім економічних умов [4], що передбачає розвиток, будівництво підприємств, транспортних споруд, налагоджування випуску сучасної продукції, для маріупольських підприємств це традиційно транспортне машинобудування.

**Постановка завдання.** Слушно використовувати два підходи до вирішення проблеми. Миттевий – при залученні коштів інвесторів з Китаю чи Туреччини. Пошук власних можливостей при уподобанні проектів підприємцями, працівниками, місцевою та міністерською владою. Тенденції зрушень у певному напрямі вказують на поживавлення товарообміну, підвищення доходів населення, засобів комунікації.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Для утворення сприятливих умов зростання плануємо звернутися до прийому, обробки суден у гирлі річки Кальміус. Тому з урахуванням природних умов плануємо збудувати низку причалів уздовж берега. Західний берег віддамо більшості підприємств, що там базуються, а східний, більш небезпечний, бо примикає до автомобільної дороги республіканського значення, здаємо в нетривалу оренду.

У разі випуску довгих рейок власник обере найбільш вигідний варіант доставки, що запро-



понує місто. Певна річ, транспортування рікою менш енергетично витратне, але потребує, окрім будівництва причалів, греблі, створення флоту й засобів керування. Після розгляду геологічних умов – рельєфу, контурів русла, доцільним є використання барж.

Для спрямування барж не лиш за течією використовують буксири з малою осадкою, але не завжди умови проходження дають змогу їх використання. Тому надалі для зниження витрат, забруднення плануємо керувати рухом тягачем із лебідкою. Для полегшення керування встановлюємо надалі лебідку, блок на греблю й у гирлі.

Канат за відсутності вантажу занурюємо у воду, для схорону його рясно змащуємо. Так організуємо транспортування за трьома варіантами. Вибір варіантів і їх утворення пов'язані з інтенсивністю орендування, спеціалізації, використанням берегової лінії під відпочинок, спортивними заходами, яхтінгом.

Утворений басейн зручно використовувати як й експериментальну базу під час атестації, випробувань, посвідчення моделей і суден. Найбільший флот в Україні річковий, але й для нього потрібно узгодження для виходу в Дон. Регістрова служба успішно працює в Маріуполі, маємо випуск катерів, нафтосмітезбиральників, яхт.

Побудова суден для технологічних перевезень для розвантаження парку рухомого складу для внутрішніх перевезень можлива в доках створених азовського судноремонтного заводу, миколаївського суднобудівного заводу чи іноземних фірм. Помітна поява гумових човнів із рибалками на річці. Далекі рейди непокоять прикордонників, росіян, тому інфраструктурні зміни на часі.

Для планування, порівняння впливів на різних ділянках порівнюємо їх як найбільші з малих і найменші з великих. У нашому випадку це найбільші з малих у руслі, на перегонах і найменші з найбільших біля мостів, мілин, на станціях між стиками хрестовин. Ротація місця розташування зумовлює устрій у певний час зручної ділянки завантаження, переміщення.

Під час їх порівняння на мережі, яка містить  $km$  обходів, стиків різної величини розбіжності, розбіжності глибини, стику в місці переходу від одного фарватеру, однієї рейки до іншої. Тут  $k$  – натуральні числа більші за 1,  $k$  – число проходів у руслах, колій на перегонах, перевантажувальних ділянках, станціях, портах,  $m$  – кількість перегонів, причалів, перевантажувальних шляхів, станцій, терміналів.

На полігоні оберемо з  $km$  шляхів різних перевищень абсолютно довільно  $2k + m - 2$  відрізка шляху

й розставимо їх уздовж трьох сторін прямокутника за величиною перевищень у порядку спадання  $r_1, r_2, \dots, r_{2k + m - 2}$  рядами по шерензі (рис. 1).

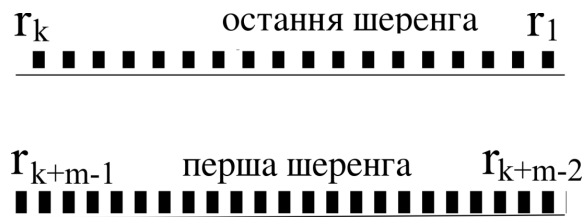


Рис. 1. Композиція шляху за спаданням

Решту шляху розставимо заповнюючи прямокутний лад випадковим чином. Шлях  $r_k$  буде найменшим із довгих шляхів, шлях  $r_{k + m - 1}$  буде найдовшим із менших шляхів, а так як  $r_k > r_{k + m - 1}$ , то найменший із довгих відрізків буде більший за найдовший із малих відрізків шляху.

Коли  $k + 2m - 2$  шляхи  $r_1, r_2, \dots, r_{k + 2m - 2}$  розставимо в порядку спадання значень (рис. 2).

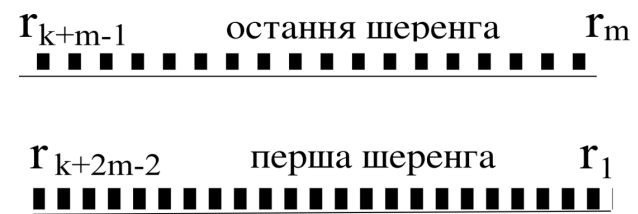


Рис. 2. Композиція з конкурентним вибором шляху

Інші шляхи згрупуємо прямокутником випадковим чином. Тоді шлях  $r_{k + m - 1}$  буде найкоротшим із довгих, а шлях  $r_m$  буде найдовшим із коротких, оскільки  $r_{k + m - 1} < r_m$ , найкоротший із довгих буде меншим за найдовший із коротких.

Подібний підхід дає змогу відмовитися від орієнтування на установку найдовший шлях, найкоротший шлях, залишивши визначення для орієнтування більше, менше, покладаючись на цифри. Однак у разі переходу з одного типу рейок, обладнання, причальних споруд, барж на інші такі визначення своєчасні [5].

Вплив коливань від середовища на транспорт відображають параметри в'язкості, пружності, насиченості, температури. Це вимагає установки датчиків наближення, GPS, швидкості. Проходження шляху, подолання перешкод на безпечній дистанції вимагають обмежень габаритів і проекту просування водним маршрутом.

**Постановка завдання** полягає в установленні відповідності розмірів транспортного засобу, судна й наближення споруд, берега, банок, дна. Власне фарватер буде на півметра більшим при

постійному квартальному контролю. Обміру підлягає підводна частина.

Розміри судна  $L$ ,  $B$ ,  $h$  повинні бути  $L > B > h$ ,  $L > l_r$ ,  $Ml_b > L$ ,  $B$ ,  $Mh > h$ .

Умовою прохідності маршруту буде проходження між двома тригонометричними функціями відхилення від центральної, осьової, серединної до мілини, берега, виконаної на scilab (рис. 3). Так як обмежені кошти спорудження та експлуатації причалу відвантаження, то розбіжність, максимальна між трендами, вкаже на місце розташування кнехта на березі.

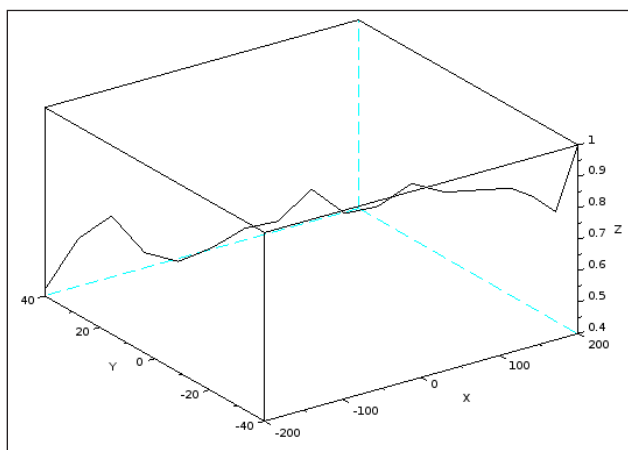


Рис. 3. Промірювання глибини фарватеру

У разі зниження впливу на русло фарватер досягне спорудження при мінімумі турбулентності течії, що визначає критерій подібності співвідношення сил в'язкого тертя й інерції течії. У разі використання криголамного буксира, лебідок чалення та координації їх дій з баржею потрібно відстеження сонарами, лазером, wi-fi до критерію електромагнітної гомохронності.

Автоматизація процесів на базі мікроконтролерів установлює технологічний режим проходження, у нашому випадку від прокатного цеху до судна в порт призначення. Корпус судна має вигляд плоского дна з невеликими бортами (рис. 4). Для полегшення киль можна утворити зварюванням прокату змінного перерізу [6].

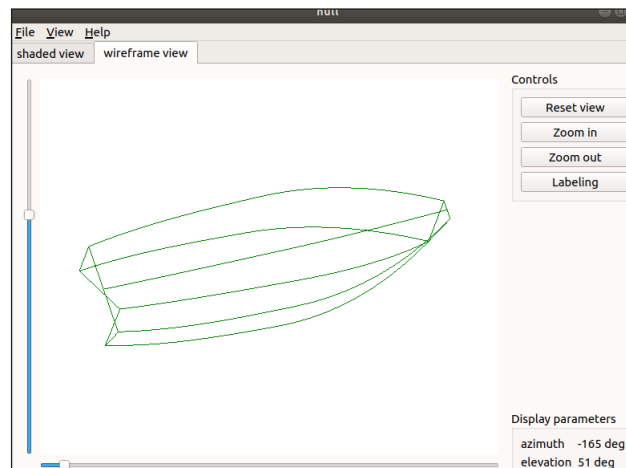


Рис. 4. Баржа для рейок

**Висновки.** Досвід рекреації заплави Кальчика дає традицію освоєння гирла Кальміусу: висаджені дерева на правому березі й поступове зміцнення його інженерними спорудами в поєднанні з природними обрисами створюють колоритні інсталяції річкового порту, відроджують спортивні секції, веслову базу, модельні водні та повітряні навігаційні гуртки.

Використання побудови транспортної інфраструктури в подальшому сприяє утворенню флоту до технологічних перевезень продукції підприємств.

#### Список літератури:

1. Що відбувається в Азовському морі? URL: <http://www.bbc.com/ukrainian/features-44195775> (дата звернення: 26.07.2018).
2. Семенов В.Ф., Бикова О.Д. Сучасні умови та проблеми розвитку водного транспорту. Економіка та менеджмент. Серія «Економічні науки»: збірник наукових праць. Луцьк: ЛНТУ, 2010. Вип. 7 (26). Ч. 3. С. 133–146.
3. Борщ В.І. Стан та проблеми розвитку підприємств суднобудівельної галузі промисловості України. Економіка: реалії часу: науковий журнал. 2014. № 3 (13). С. 22–29.
4. Котлубай О.М. Економічний механізм розвитку торговельного мореплавання України: автореф. дис. ... докт. екон. наук: спец. 08.07.04. Одеса, 2004. 37с.
5. Smith Norman J. The Sea of Lost Opportunity. Oxford, UK: Elsevier, 2018. P. 320.
6. Мінімізація маси плоского днища циліндричного апарату / Ю.М. Хом'як, С.А. Науменко, В. Щеглова, В. Попов. Східноєвропейський журнал передових технологій. 2018. Том 2. № 1 (92). С.42–50.

### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ БАРЖ В ПЕРЕВОЗКАХ ДЛИННЫХ РЕЛЬСОВ**

*В статье предлагаем осуществлять выбор параметров судна от бассейна плавания с целью создания флота для технологических перевозок. Улучшение условий перевозок путем разветвления транспортной инфраструктуры. Развитие причалов в устье реки. Использование причалов для общего доступа грузовладельцев. Правовое согласование использования мест погрузки.*

**Ключевые слова:** баржа для рельсов, причалы общего назначения, очистка опасной зоны, лебедка судна, ротация фронтов погрузки.

### **DETERMINATION OF BARJES PARAMETERS FOR THE TRANSPORT OF LONG RAILS**

*It is proposed to select the parameters of the vessel from the swimming pool in order to form a fleet for technological transport. Improving transport conditions by branching out transport infrastructure. Construction of berths at the mouth of the river. Use of berths for the general access of cargo owners. Legal harmonization of the use of cargo places.*

**Key words:** barge for rail, general piers, cleaning of the hazardous zone, ship winch, rotation of loading fronts.

## ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

УДК 621.31

**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»

**Клепач Л.Є.**

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

**Лайкова Л.Г.**

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

**Палій Д.М.**

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

## **ОГЛЯД ОСНОВНИХ МОДЕЛЕЙ ПРОГНОЗУВАННЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ В MICROGRID**

*Завдання прогнозування майбутніх значень часового ряду є основою для планування, керування та оптимізації роботи в системі MicroGrid. Прогнозування дозволяє визначити періоди пікових навантажень та уникнути їх шляхом зміни режимів навантажень або підключення додаткових джерел живлення. Проведено огляд методів і моделей прогнозування енергоспоживання в системах MicroGrid. Запропоновано класифікацію методів і моделей. Проведено порівняльний аналіз, визначено переваги і недоліки моделей, а також можливі галузі застосування.*

**Ключові слова:** методи і моделі прогнозування, енергоспоживання, системи MicroGrid.

**Постановка проблеми.** Необхідність точного прогнозування електроспоживання в системах MicroGrid зумовлена технічними і економічними причинами. Із технічної точки зору прогнозування дозволить уникати пікових навантажень або зменшувати негативний вплив та підвищити надійність енергосистеми. Економічні причини пов'язані з функціонуванням локальних ринків електроенергії, при цьому зростає важливість прогнозування енергоспоживання учасників цих ринків, оскільки перевищення фактичного споживання від заявлених значень понад певної межі призводить до необхідності покупки електроенергії збалансуючого ринку за більшою ціною. Відхилення в меншу сторону теж карається оплатою недопоставленої електроенергії як різниці між

заявленим і фактичним споживанням за встановленими розцінками [1]. Складність прогнозу зумовлена наявністю великої кількості споживачів і необхідністю врахування багатьох таких факторів, як температура навколишнього повітря; ступінь освітленості; тривалість світлового дня; день тижня; переходи з зимового на літній час і назад; наявність екстраординарних подій (катастрофи, масові акції); прогнози погодних умов; стан інших факторів, що впливають на зміну споживання відповідно до даних, отриманих у результаті оброблення статистики споживання; плановані включення / відключення енергоємних виробництв [1–5].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У [6] наведено дані енергоспоживання та вироб-

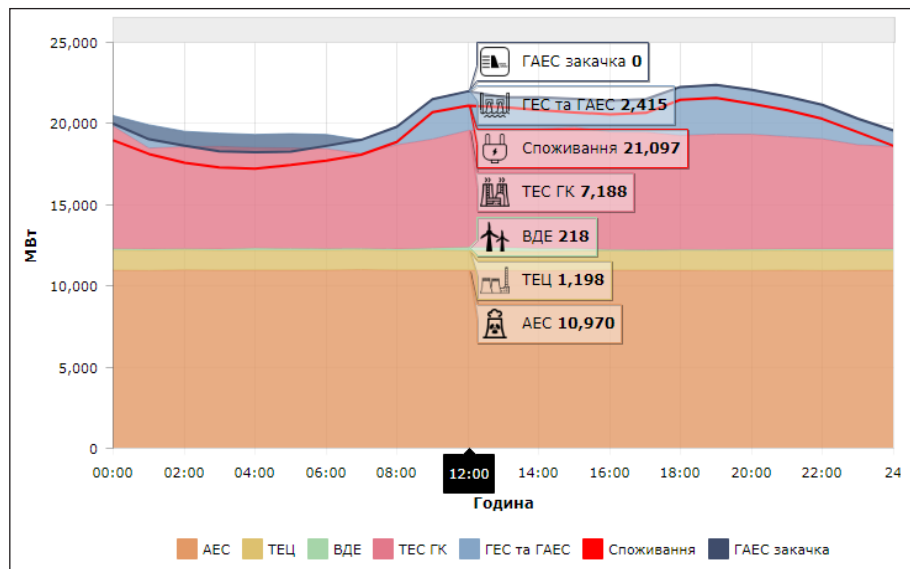


Рис. 1. Добовий графік енергоспоживання та виробництва електроенергії в Україні за 24.02.2018

ництва електроенергії в Україні. Як приклад розглянемо добовий графік за 24 лютого 2018 року (рис. 1).

Як видно з рис.1, електроспоживання має два локальних максимуми: близько 12:00 та 18:00. Найбільший спад енергоспоживання спостерігається в період з 01:00 по 05:00. Рис.1 відображає такі складники виробництва: АЕС – атомні електростанції; ТЕЦ – теплоелектроцентралі; ВДЕ – відновлювані джерела енергії; ТЕС ГК – енергогенеруючі компанії теплових електростанцій; ТЕС та ГАЕС – гідроакumuлюючі та гідроелектростанції. Окремий внесок у споживання вносить ГАЕС закачка. Видно, що АЕС та ТЕЦ забезпечують стабільний постійний рівень виробництва протягом доби. З іншого боку, ТЕС ГК разом із ТЕС та ГАЕС покривають локальні максимуми електроспоживання, забезпечуючи постійний запас потужності при зміні рівня енергоспоживання. При найменшому рівні попиту в нічний період доби для компенсації перевиробництва електроенергії, вмикається процес закачки на ГАЕС для генерації в пікові періоди. Хоча в масштабах України внесок ВДЕ є порівняно незначним, але для MicroGrid він досить вагомий. Як видно з рис. 2, ВДЕ характеризуються високою нестабільністю рівня генерованої потужності.

Це пояснюється залежністю ВДЕ від погодних умов (напрямку та швидкості вітру, сонячного освітлення і т.д.). Тому актуальним завданням для керування навантаженнями MicroGrid є прогнозування енергоспоживання за різних умов зовнішнього середовища.

Сьогодні завдання прогнозування часового ряду електроспоживання у MicroGrid вирішується на основі створення моделі, що адекватно описує досліджуваний процес. Серед багатьох моделей прогнозування часових рядів найбільшого поширення дістали, зокрема авторегресійні і нейромережеві моделі [7–10]. Кожна з них має свої переваги та недоліки, а також певні обмеження для вирішення того чи іншого класу практичних задач.

**Постановка завдання. Метою статті** є проведення огляду основних методів і моделей прогнозування, порівняння та класифікації з метою виявлення перспективних методів і моделей та рекомендацій щодо їх застосування для прогнозування електроспоживання в системах MicroGrid.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Залежно від наявності інформаційних даних методи прогнозування поділяють на фактографічні (формалізовані), експертні (інтуїтивні) і комбіновані (рис. 3) [11].

Фактографічні (формалізовані) методи ґрунтуються на достатньому інформаційному матеріалі про об'єкт прогнозування та його минулий розвиток. Формалізовані методи засновані на математичних моделях і поділяються на методи предметної галузі (механіки, термодинаміки, електротехніки тощо) та методи моделювання часових рядів, які відшукують залежності всередині самого процесу. Методам предметної галузі властивий індивідуальний підхід, а методи моделювання часових рядів є універсальними для різних предметних галузей [10; 11].



Рис. 2. Добовий графік виробництва енергії на електростанціях з ВДЕ в Україні (а – 24.02.2018, б – 25.02.2018)

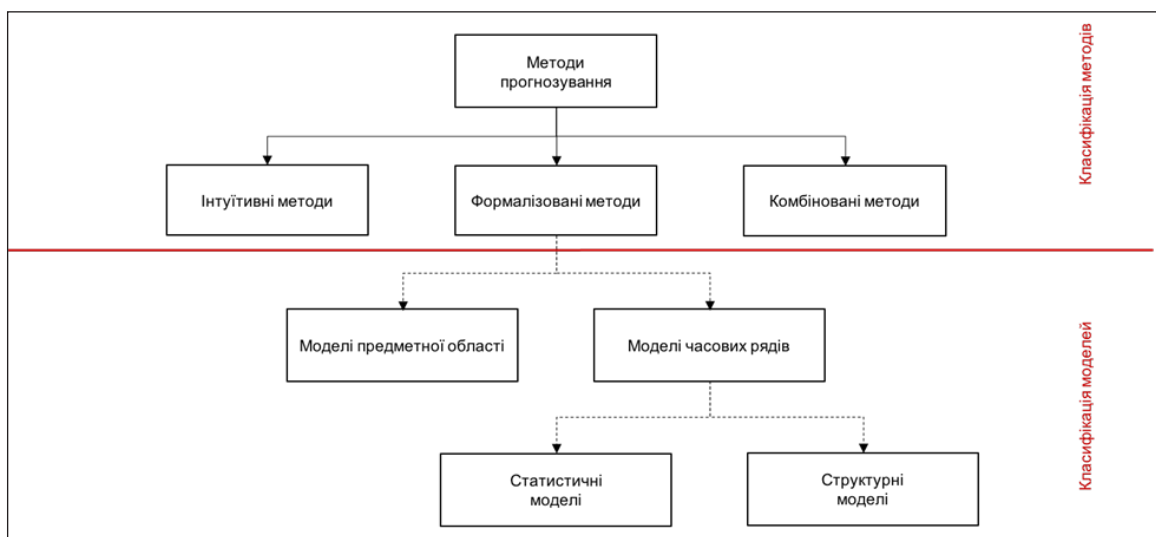


Рис. 3. Класифікація методів та моделей прогнозування

Експертні методи застосовують у випадках недостатнього обсягу інформації про поведінку та розвиток об'єкта дослідження у минулому. Вони побудовані на інформації, отриманій з експертних оцінок.

Комбіновані методи прогнозування об'єднують експертні і фактографічні методи. Прикладом таких методів може бути метод Pattern matching, за якого експерти формулюють колективні судження на основі використання принципу «дерева цілей». Інколи до цієї групи відносять моделі на базі нечіткої логіки. Нечітка логіка є розширенням експертних систем, а тому потребує переведення реального досвіду у формат нечітких правил [12].

Серед розглянутих методів для прогнозування енергоспоживання в MicroGrid найбільш придатним є формалізований метод, оскільки при цьому можливо автоматизувати процес прогнозування. Крім того, поведінка кривої енергоспоживання описується функцією часу, тому обирається група моделей часових рядів.

Моделі часових рядів можна розділити на дві групи: статистичні та структурні [10]. У статистичних моделях у результаті аналізу історичних даних формується рівняння, що відображає залежність між енергоспоживанням і пов'язаними зовнішніми факторами. Як правило, статистичні моделі дозволяють виконати прогноз для звичайного дня дуже добре, але в них не закладено достатньо гнучкості, щоб аналізувати святкові та інші нерегулярні дні. У структурних моделях залежність наступного значення від попереднього задається у вигляді деякої структури та правил переходу по ній.

Моделі часових рядів поділяються на статистичні та структурні. Група статистичних моделей включає в себе економетричні, регресійні та авторегресійні моделі. Економетричні моделі засновані на згладжуванні, експонентному згладжуванні й ковзному середньому [3]. Серед них розрізняють такі, як «найвна» модель прогнозу;

## Порівняння моделей прогнозування

Моделі	Переваги	Недоліки
Статистичні моделі		
Регресійні	Простота та гнучкість моделювання.	Трудомісткість знаходження коефіцієнтів залежності; неможливість моделювання нелінійних процесів
Авторегресійні	Простота моделювання; велика різноманітність сфер застосування	Трудомісткість і ресурсомісткість ідентифікації; неможливість моделювання нелінійностей; низька адаптивність
Моделі експоненціального згладжування	Простота моделювання;	Недостатня гнучкість; обмеженість застосування
Структурні моделі		
Нейромережеві моделі	Нелінійність; масштабованість, висока адаптивність; велика різноманітність сфер застосування	Відсутність прозорості; складність вибору архітектури; жорсткі вимоги до навчальної вибірки; складність вибору алгоритму навчання; ресурсомісткість процесу навчання
Моделі на базі ланцюгів Маркова	Простота моделювання;	Неможливість моделювання процесів з довгою пам'яттю; вузька застосовність моделей
Моделі на базі класифікаційних регресійних дерев	Масштабованість; швидкість і простота процесу навчання; можливість враховувати категоріальні змінні	Неоднозначність алгоритму побудови дерева; складність питання зупинки

модель обчислення прогнозу на основі середнього згладжування; модель обчислення прогнозу на основі експонентного згладжування.

Моделі цього типу роблять прогнози на основі лінійних комбінацій споживання значення від «подібних» днів [11]. Під час створення «наївних» моделей передбачається, що деякий період прогнозованого часового ряду в минулому найкраще описує майбутнє ряду. У моделі обчислення прогнозу на основі середнього згладжування закладено принцип «завтра буде, як було в середньому за останній час». Така модель є стійкішою до коливань, ніж «наївна». Модель на основі експонентного згладжування визначає залежність прогнозу від усіх розглянутих даних, причому вплив даних на прогноз експоненційно зменшується із «віком» даних. Розвитком моделей цього типу є моделі двопараметричного згладжування Хольта і Брауна, а також трипараметричної моделі Вінера. Цей клас моделей частіше інших використовується для довгострокового прогнозування [13].

Регресійні моделі поєднують у собі кілька незалежних функцій, утворюють лінійну функцію, що допомагає інтерпретувати залежності між різними факторами. Для прогнозування електроспоживання від альтернативних джерел живлення, таких як фото- та вітрогенератори, будується модель дерева з використанням даних про погоду і графік даних для прогнозування споживання енергії. Ця модель оцінює вплив різних комбіна-

цій ознак на точність прогнозування. Зазначимо, що під час використання лінійних регресійних моделей результат прогнозування може бути отриманий швидше, ніж під час використання інших моделей. Нелінійні регресійні моделі характеризуються великою трудомісткістю визначення параметрів.

Автогресивні моделі (наприклад, Бокса-Дженкінса) є найбільш популярними із статистичних моделей [14]. У відкритому доступі легко знайти приклади застосування авторегресійних моделей (ARIMA, ARIMAX, GARCH, ARDLM) для вирішення завдань прогнозування часових рядів різних предметних галузей. Моделі спираються тільки на інформацію, що міститься в передісторії прогнозованих рядів, що обмежує можливості алгоритму.

Недоліком авторегресійних моделей є велика кількість вільних параметрів, ідентифікація яких є неоднозначною, а також значна ресурсомісткість [8].

Група структурних моделей (див. рис.3) включає в себе нейромережеві моделі, моделі на базі ланцюгів Маркова та на базі класифікаційних регресійних дерев.

Прогнозування на базі штучних нейронних мереж (Artificial Neural Networks – ANNs) прагне визначити залежності між вхідним і вихідним наборами даних. Вони добре справляються під час роботи з нелінійними залежностями між

енергоспоживанням і зовнішніми факторами, але мають низку недоліків: складність вибору алгоритму навчання нейронної мережі [9]; значний час навчання [15]; можливу «перетренованість мережі» (overfitting); недоступність проміжних обчислень, які виконуються в «чорному ящику» і складність інтерпретації результатів.

Моделі прогнозування на основі ланцюгів Маркова припускають, що майбутній стан процесу залежить тільки від його поточного стану і не залежить від попередніх. Моделі використовують матрицю ймовірностей переходів системи з одного стану в інший. Структура ланцюга Маркова та ймовірності переходу станів визначають залежність між майбутнім значенням процесу та його поточним значенням. У роботі [16] пропонується подвійно зважений алгоритм максимізації правдоподібності, основна мета якого полягає у подоланні однієї з проблем класичних прихованих марківських моделей – однакової значущості всіх фрагментів даних для прогнозу.

Моделі на базі класифікаційно-регресійних дерев розроблено для моделювання процесів, на які впливають як безперервні зовнішні фактори, так і категоріальні [16].

Переваги і недоліки основних моделей систематизовано в таблиці 1.

Аналіз досліджень із прогнозування споживання енергії в системах SmartGrid і MicroGrid

показав, що в них використовувалися прості моделі усереднення; статистичні моделі (наприклад, регресія і часові ряди) і моделі штучних нейронних мереж. У роботі [17] показано переваги комбінованої моделі, яка містить два етапи: фільтрації нестационарної складової енергоспоживання та нейронної мережі з пам'яттю. Фільтрація нестационарного складника за допомогою вейвлет-перетворення дозволила зменшити кількість входів нейронної мережі під час забезпечення заданого коефіцієнта схожості вихідної та відфільтрованої функцій енергоспоживання.

**Висновки.** Завдання прогнозування майбутніх значень часового ряду є основою для планування, керування та оптимізації роботи в системі MicroGrid. Прогнозування дозволяє визначити періоди пікових навантажень, уникнути їх або зменшити вплив на робочі режими шляхом зміни режимів навантажень або підключення додаткових джерел живлення.

На базі проведеного огляду моделей прогнозування енергоспоживання обрано формалізований метод та групу моделей часових рядів. Серед них перспективним є метод на базі поєднання фільтрації та нейронної мережі. Остаточний вибір конкретної моделі потребує подальшого дослідження і порівняння точності прогнозу в конкретних задачах.

#### Список літератури:

1. Бокс Дж., Дженкінс Г.М. Анализ временных рядов, прогноз и управление. Москва: Мир, 1974. 406 с.
2. Доманов В.И., Билалова А.И. Анализ прогнозирования энергопотребления с различными информационными базами. Современные наукоемкие инновационные технологии: работа 6 всероссийской научн.-техн. конф. (Самара, 2–4 декабря 2014 г.). Самара, 2014.
3. Пальчиков А.С. Существующие способы прогнозирования электропотребления объектов в металлургической отрасли. Современные научные исследования и инновации. 2012. № 9. С. 12–17.
4. Седов А.В., Надтока И.И. Системы контроля, распознавания и прогнозирования электропотребления: модели, методы, алгоритмы и средства. Ростов-на-Дону: Изд-во Рост. ун-та, 2002. 318 с.
5. Егошин А.В. Анализ и прогнозирование сложных стохастических сигналов на основе методов ведения границ реализаций динамических систем: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2009. 19 с.
6. Диспетчерська інформація УкрЕнерго. URL: <https://ua.energy/diyalnist/dyspetcherska-informatsiya/dobovuj-grafik-vyrobnytstva-spozhyvannya-e-e/> (дата звернення: 24.02.2018).
7. Gheyas I.A., Smith L.S. A Neural Network Approach to Time Series Forecasting. Proceedings of the World Congress on Engineering. London, 2009. Vol. 2. P. 1292–1296.
8. Morariu N., Iancu E., Vlad S. A Neural Network Model for Time Series Forecasting. Romanian Journal of Economic Forecasting. 2009. No. 4. P. 213–223.
9. Mazengia D.H. Forecasting Spot Electricity Market Prices Using Time Series Models: Thesis for the degree of Master of Science in Electric Power Engineering; Chalmers University of Technology. Gothenburg, 2008. 89 p.
10. Jingfei Yang M. Sc. Power System Short-term Load Forecasting: Thesis for Ph.d degree; Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universitat. Germany, Darmstadt, 2006. 139 p.
11. Моделі і методи прогнозування. URL: [http://info-library.com/content/2122\\_Metodi\\_i\\_modeli\\_prognozyvannya.htm](http://info-library.com/content/2122_Metodi_i_modeli_prognozyvannya.htm) (дата звернення: 07.07.2018).



12. Кравець П., Киркало Р. Системи прийняття рішень з нечіткою логікою. Вісник Національного університету «Львівська політехніка»: Комп'ютерні науки та інформаційні технології. 2009. № 650. С. 115–123.
13. Prajakta S.K. Time series Forecasting using Holt-Winters Exponential Smoothing. Kanwal Rekhi School of Information Technology Journal. 2004. 13 p.
14. Тихонов Э.Е. Прогнозирование в условиях рынка. Невинномысск, 2006. 221 с. URL: [http://www.mirkin.ru/\\_docs/tiho.pdf](http://www.mirkin.ru/_docs/tiho.pdf) (дата звернення: 25.06.2018).
15. Gheyas I.A., Smith L.S. A Neural Network Approach to Time Series Forecasting. Proceedings of the World Congress on Engineering. London, 2009. Vol. 2. P. 1292–1296.
16. Zhang Y. Prediction of Financial Time Series with Hidden Markov Models: Master of Applied Science in the School of Computing Science; Simon Fraser University. 2004. P. 102.
17. Yamnenko J., Tereshchenko T., Klepach L., Pali D. Forecasting of electricity consumption in SmartGrid. International Conference Modern Electrical and Energy Systems MEES'17 Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University. (Kremenchuk, 15-17 Nov. 2017). URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8248891> (дата звернення: 25.06.2018). DOI: 10.1109/MEES.2017.8248891.

### **ОБЗОР ОСНОВНЫХ МОДЕЛЕЙ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ В MICROGRID**

*Задача прогнозирования будущих значений временного ряда является основой для планирования, управления и оптимизации работы в системе MicroGrid. Прогнозирование позволяет определить периоды пиковых нагрузок, чтобы избежать их либо уменьшить их влияние путем изменения режимов нагрузок или подключения дополнительных источников питания. Проведен обзор методов и моделей прогнозирования энергопотребления в системах MicroGrid. Предложена классификация методов и моделей. Проведен сравнительный анализ, определены преимущества и недостатки моделей, а также возможные области их применения.*

**Ключевые слова:** методы и модели прогнозирования, энергопотребление, системы MicroGrid.

### **REVIEW OF MAIN MODELS FOR FORECASTING POWER CONSUMPTION IN MICROGRID**

*The task of predicting the future values of the time series is the basis for planning, managing and optimizing the work in MicroGrid. Forecasting allows to determine the periods of peak loads in order to avoid them or minimize their influence by changing the load modes or connecting additional power supplies. The overview of methods and models for energy consumption forecasting in MicroGrid systems was conducted. The classification of methods and models was proposed. A comparative analysis outlining the advantages and disadvantages of the models, as well as possible areas of their application was carried out.*

**Key words:** forecasting methods and models, power consumption, MicroGrid.

УДК 621.31

**Ямненко Ю.С.**

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

**Демченко Ю.С.**

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

## ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ КОРЕКЦІЇ КОЕФІЦІЄНТА ПОТУЖНОСТІ

*Для усунення спотворень вхідного струму та розширення діапазону роботи коректора запропоновано схему додаткової комутації транзистора. Ця схема додатково відкриває силовий транзистор, дросель коректора при цьому накопичує енергію, яка після закривання транзистора віддається у конденсатор, піднімаючи вихідну напругу. Такий підхід дозволяє суттєво покращити форму вхідного струму. Проте схема додаткової комутації не дозволяє досягнути бажаного результату для керування по середньому струму. Для цього методу керування розроблено цифровий коректор зі спрощеним зворотним зв'язком, що усуває спотворення вхідного струму при суттєвому збільшенні навантаження та забезпечує попередню стабілізацію вихідної напруги коректора. Порівняння запропонованого алгоритму з класичним керуванням зі зворотним зв'язком по напрузі показало, що кількість обчислень зменшилася майже вдвічі.*

**Ключові слова:** гармоніки струму, коректор коефіцієнту потужності, схема комутації, зворотний зв'язок, метод керування.

**Постановка проблеми.** Сьогодні велика кількість навантажень, що підключаються до мережі живлення, споживає струм, який суттєво відрізняється від синусоїдального. Це призводить до того, що в мережу генерується значна кількість вищих гармонік струму. Найпоширенішими джерелами вищих гармонік у системах електроживлення є випрямлячі, джерела безперебійного живлення, тиристорні системи, імпульсні джерела живлення, частотні приводи змінного струму, зварювальні апарати, освітлювальна апаратура та дугові плавильні печі. При цьому сумарна потужність нелінійних навантажень може становити 60–80% від потужності всіх споживачів електромережі [1].

Із метою запобігання негативного впливу вищих гармонік струму в мережі живлення застосовуються коректори коефіцієнта потужності (далі – ККП) [2; 3].

Дослідження коректора без зворотного зв'язку по вихідній напрузі показало, що при помітному зростанні навантаження відбувається просідання вихідної напруги нижче амплітудного значення напруги мережі живлення, що призводить до спотворення форми споживаного струму.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Розрахунок процесів у активному високочастотному коректорі здійснено в роботі [4]. Деталі

проекування однофазних коректорів представлено в [5]. У [6] описано різні методи керування активними коректорами, проте не надано порад щодо доцільної галузі застосувань. Цифрове керування із зоною нечутливості запропоноване у [7], а в [8] реалізоване цифрове керування з прогнозуванням. У роботі [9] наведено адаптивний метод керування широтно-імпульсним перетворювачем, проте не представлено реалізацію цього методу для коректора коефіцієнта потужності.

**Постановка завдання.** Найбільшого поширення набули такі методи керування активними високочастотними ККП, як граничний, метод по піковому струму та по середньому струму. Кожному з них притаманні певні недоліки. Так, недоліком пікового методу керування є спотворення вхідного струму в галузі переходу через нуль. Дослідження цього питання проведене у роботі [10], де запропоновано до еталонного сигналу додавати сигнал постійної величини. Проте особливістю такого підходу є те, що за малих навантажень коректор стає некерованим.

Таким чином, подальше дослідження існуючих та створення нових методів керування активними високочастотними коректорами коефіцієнта потужності є актуальним завданням. Метою статті є розроблення методів підвищення ефективності

високочастотних коректорів коефіцієнта потужності шляхом застосування нових схемотехнічних рішень та способів керування.

#### Виклад основного матеріалу дослідження.

Схема додаткової комутації транзистора коректора коефіцієнта потужності. Зазвичай напівпровідникові перетворювачі електроенергії з корекцією коефіцієнта потужності будуються за двокаскадним принципом (рис. 1). Коректор виконує функцію примусового формування вхідного струму практично синусоїдальної форми, а високочастотний перетворювач (далі – ВЧ) забезпечує для навантаження постійну напругу заданого рівня.



Рис. 1. Двокаскадна схема перетворювача з ККП

Якщо функцію стабілізації вихідної напруги покласти на перетворювач, то можна використати коректор зі спрощеною структурою (рис. 2), у якому відсутній зворотній зв'язок по вихідній напрузі. Це дозволяє суттєво спростити систему керування, оскільки зникає необхідність використання аналогового помножувача (що є досить складним елементом) та підсилювача помилки по напрузі. Найбільш доцільним при цьому є використання найпростішого методу керування – граничного.

Недоліком такого підходу є те, що за суттєвого зростання навантаження вихідна напруга коректора може опуститися нижче амплітудного значення напруги мережі живлення, а це призводить до спотворення форми споживаного струму [11]. Із діаграм, наведених на рис. 3, видно, що в інтервалі  $t1-t2$  вхідна напруга перевищує вихідну  $i$ , як наслідок, вхідний струм коректора є значно спотвореним. Транзистор VT (див. рис. 2) при цьому перебуває в закритому стані.

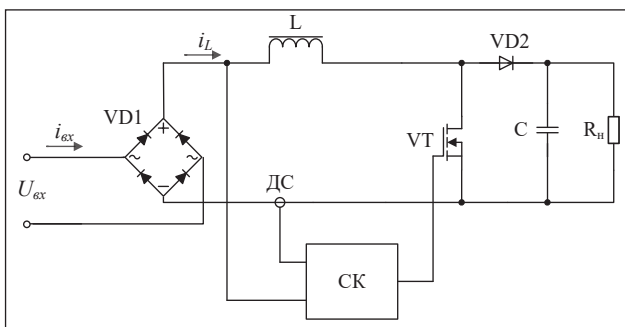


Рис. 2. Схема ККП без зворотного зв'язку по напрузі

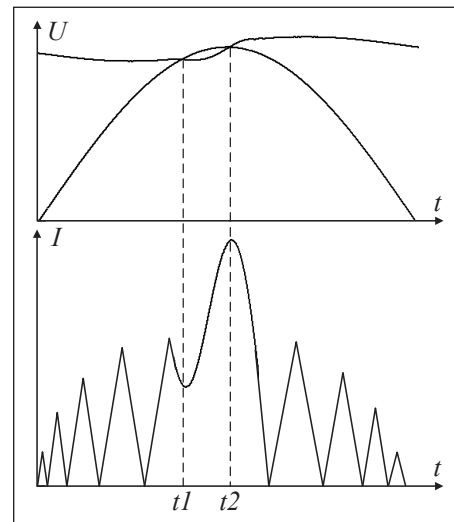


Рис. 3. Приклад спотворення вхідного струму коректора

Для усунення спотворення вхідного струму та розширення діапазону роботи коректора необхідно додатково відкривати транзистор VT. При цьому дросель L накопичує додаткову енергію, яка після закривання транзистора віддається в конденсатор C, піднімаючи вихідну напругу коректора. Такий підхід дозволяє суттєво покращити форму вхідного струму.

Для додаткового відкривання транзистора запропоновано схему коректора, яка зображена на рис. 4 [12].

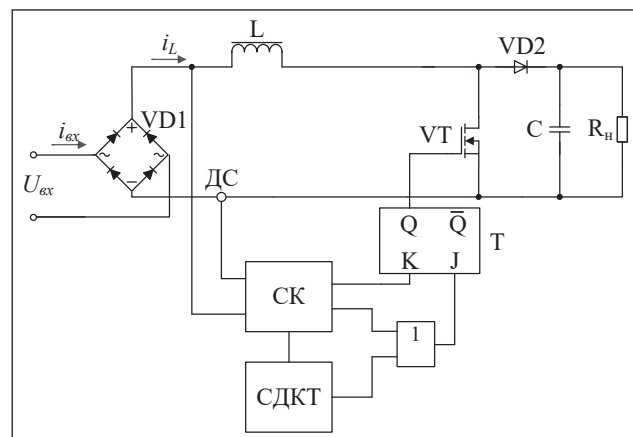


Рис. 4. Коректор зі схемою додаткової комутації транзистора

Особливістю цієї схеми є те, що до вже існуючої системи керування додано схему додаткової комутації транзистора (СДКТ). Структура СДКТ наведена на рис. 5, вона складається з генератора прямокутних імпульсів ТГ та лічильника імпульсів СТ. Лічильник підсумовує вхідні імпульси від генератора, що подаються на його вхід С. На

вхід R, що призначений для скидання лічильника в нульовий стан, подається сигнал від системи керування (СК).

Сигнал із виходу переповнення лічильника P подається на вхід елемента АБО «1» (див. рис. 4), що використовується для логічного підсумовування сигналів, що надходять від СК та СДКТ.

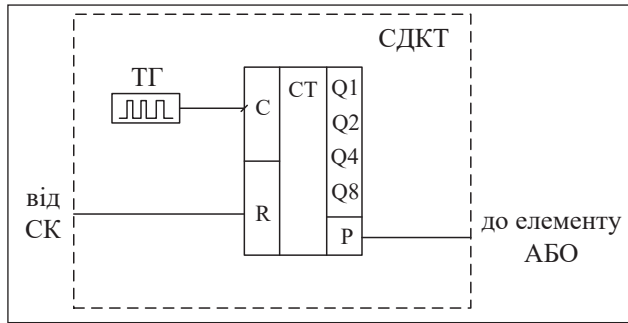


Рис. 5. Схема додаткової комутації транзистора

Опишемо детальніше принцип роботи схеми додаткової комутації. Згенеровані прямокутні імпульси від ТГ надходять на рахунковий вхід С лічильника СТ. При переповненні на виході Р лічильника генерується одиничний імпульс. Даний імпульс встановлює тригер Т в одиничний стан, що призводить до вмикання силового ключа VT. Таким чином, здійснюється додаткове відкривання транзистора коректора. Сигнал від СК використовується для обнулення лічильника і подається на його вхід R. Таким чином, якщо система працює в нормальному режимі, то обнулення лічильника відбувається при кожному відкриванні транзистора VT. У цьому разі не відбувається переповнення лічильника і схема додаткової комутації транзистора не впливає на роботу пристрою.

У разі відносно значного зменшення опору навантаження відбувається просідання вихідної напруги ККП, що призводить до зростання струму навіть при закритому транзисторі. При цьому сигнал від СК на відкривання транзистора відсутній, лічильник встигає переповнитися і на своєму виході Р видає імпульс, що додатково відкриває транзистор.

Частота слідування імпульсів генератора ТГ підбирається таким чином, щоб тоді, коли в пристрої не спостерігається спотворення вхідного струму, схема додаткової комутації не впливала на роботу ККП.

**Цифровий коректор зі спрощеним зворотним зв'язком.** Запропонована схема додаткової комутації транзистора дозволяє зменшити спотворення вхідного струму та розширити діапазон

роботи коректора з граничним методом керування без зворотного зв'язку по вихідній напрузі. Проте ця схема виявляється непрацездатною для методу керування по піковому та середньому струму, що видно з часових діаграм (рис. 6 та рис. 7).

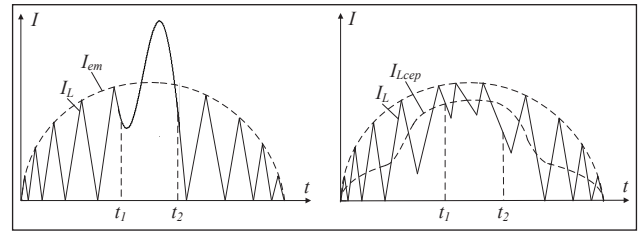


Рис. 6. Струм ККП з граничним методом керування без СДКТ (а) та із СДКТ (б)

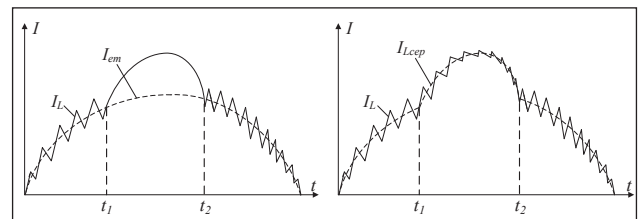


Рис. 7. Струм ККП з керування по середньому струму без СДКТ (а) та з СДКТ (б)

Граничний метод керування (див. рис. 6) характеризується широким розмахом струму дроселя. При цьому введення СДКТ дозволяє помітно підвищити середній струм дроселя  $I_{Lср}$  в інтервалі  $t_1-t_2$  при зменшенні спотворення його форми. У разі керування по середньому струму (див. рис. 7) розмах струму дроселя  $I_L$  незначний, він фактично описує еталонний сигнал  $I_{em}$ , а тому введення СДКТ не дозволяє досягнути бажаного результату.

Для покращення форми вхідного струму ККП із керуванням по піковому або середньому струму розроблено цифровий коректор зі спрощеним зворотним зв'язком, що представлений на рис. 8. Ця схема працює таким чином: вихідна напруга коректора через АЦП надходить на блок контролю напруги (далі – БКН), при номінальному режимі роботи ця напруга становить  $U_{вих}$ . Блок керування струмом (далі – БКС) формує імпульси керування транзистором коректора згідно із заданим методом керування. У разі керування по середньому струму вхідними сигналами БКС являються оцифрована вхідна напруга, оцифрований сигнал із датчика струму та вихідний сигнал БКН. Під час керування по піковому струму на БКС додатково ще подається аналоговий сигнал із датчика струму. У разі суттєвого збільшення

навантаження коректора відбувається просідання вихідної напруги, і коли вона досягає певного порогового значення  $U_{n1}$ , БКС збільшує амплітуду еталонного струму в  $k_1$  разів.

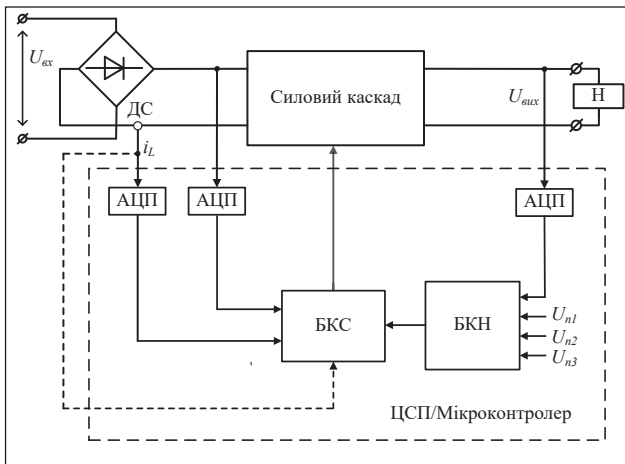


Рис. 8. Цифровий коректор зі спрощеним зворотним зв'язком

Це призводить до зростання вхідного струму коректора і, як наслідок, збільшення вихідної напруги. Спотворення вхідного струму при цьому відсутнє. Позначимо цей режим роботи ККП цифрою 2. Якщо відбувається зменшення навантаження коректора, то його вихідна напруга починає наростати і при досягненні порогового значення  $U_{n2}$  БКС зменшує амплітуду еталонного струму до номінального значення (режим 1).

У разі зменшення навантаження відносно номінального значення система керування працює у зворотному порядку. При досягненні вихідною напругою порогу  $U_{n2}$  БКС зменшує амплітуду еталонного струму в  $k_2$  раз (режим 3). Переведення ККП у номінальний режим роботи відбувається у випадку, якщо вихідна напруга спадає до величини  $U_{n1}$ .

Для уникнення неконтрольованого наростання вихідної напруги ККП у разі відключення навантаження вводиться поріг  $U_{n3}$ , під час досягнення якого припиняється подача імпульсів керування на транзистор (режим 4). У разі повторного підключення навантаження вихідна напруга зменшується і при досягненні величини  $U_{вих}$  коректор переводиться у номінальний режим роботи.

Здійснимо розрахунок коефіцієнтів масштабування еталонного сигналу. У номінальному режимі роботи вихідна напруга ККП становить  $U_{вих\text{ ном}} = 400\text{ В}$ , вихідна потужність  $P_{вих\text{ ном}} = 500\text{ Вт}$ , опір навантаження  $R_{вих\text{ ном}} = 320\text{ Ом}$ . Приймаючи

ККД коректора  $\eta = 0,95$ , отримаємо вхідну потужність:

$$P_{вх\text{ ном}} = P_{вих\text{ ном}} / \eta \approx 526\text{ Вт}. \quad (1)$$

Вхідний струм при цьому становить:

$$I_{вх\text{ ном}} = \frac{P_{вх\text{ ном}}}{U_{вх}} = \frac{526}{230} \approx 2,3\text{ А}. \quad (2)$$

У разі збільшення навантаження коректора відбувається просідання вихідної напруги. Якщо вихідна напруга знижується до 360 В, то опір навантаження при цьому становить:

$$R_{вих} = \frac{U_{вих}^2}{P_{вих}} = \frac{360^2}{500} = 259,2\text{ Ом}. \quad (3)$$

Для відновлення номінального значення вихідної напруги необхідно збільшити вихідну потужність ККП до

$$P_{вх} = \frac{U_{вих}^2}{R_{вих}} = \frac{400^2}{259,2} = 617,3\text{ Вт}. \quad (4)$$

Вхідна потужність у цьому разі становить:

$$P_{вх} = P_{вих} / \eta \approx 650\text{ Вт}. \quad (5)$$

Для забезпечення такої потужності необхідно збільшити вхідний струм до

$$I_{вх} = \frac{P_{вх}}{U_{вх}} = \frac{650}{230} \approx 2,83\text{ А}. \quad (6)$$

Коефіцієнт масштабування еталонного сигналу при цьому становить:

$$k_1 = \frac{I_{вх}}{I_{вх\text{ ном}}} = \frac{2,83}{2,3} \approx 1,23. \quad (7)$$

Прийmemo  $k_1=1,3$ . Провівши аналогічні розрахунки для випадку зменшення навантаження, отримаємо значення другого коефіцієнту масштабування  $k_2 = 0,8$ .

Оцінку складності цього алгоритму було здійснено на платі STM32F4DISCOVERY, що містить у своєму складі 32-розрядний мікроконтролер STM32F407VGT6 з апаратним модулем операцій із плаваючою комою (FPU). У разі включеного модуля FPU представлений алгоритм виконується за 51 такт, а за відключеного модуля – за 266 тактів.

Для усталеного режиму роботи коректора цей алгоритм виконується за 30 тактів, що майже вдвічі менше ніж попередній алгоритм.

**Висновки.** Таким чином, запропонована система керування дозволяє уникнути спотворення вхідного струму ККП при суттєвому збільшенні навантаження. Також ця СК забезпечує попередню стабілізацію вихідної напруги коректора. Крім того, такий підхід потребує менше обчислень, що дозволяє застосувати простіший мікроконтролер.

#### Список літератури:

1. Николаєць Д. А. Моделювання джерела безперебійного живлення на базі фільтро-компенсуючого перетворювача в середовищі Simulink. Електроніка та зв'язок. Т. 21, № 4. 2016. С. 28–32.
2. Khizir Mahmud, Lei Tao. Power factor correction by PFC boost topology using average current control method. Conference Paper of 2013 IEEE Global High Tech Congress on Electronics, November 2013. P. 16–20.
3. Channappanavar R., Mishra S. Current sensorless Power Factor correction circuit using FPGA. 2016 IEEE International Conference on Power Electronics Drives and Energy Systems, December 2016.
4. Белов Г.А., Алексеев А.А., Нестеров А.В. Расчет процессов в широтно-импульсном корректоре коэффициента мощности. Электричество. №9. 2004. С. 48 – 56.
5. Мелешин В.И., Нечагин М.А. Проектирование однофазных выпрямителей с активной коррекцией коэффициента мощности. Электротехника. №3. 1998. С. 42–48.
6. Aghay Kabolia S. Hr., Mansouri M., Jeyraj Selvaraj. Controlling Methods for Power Factor Correction of Storage Devices Connected into Smart Grid. IEEE International Conference on Clean Energy and Technology, November 2014.
7. Prodic A., Maksimovic D., Erickson R. W. Dead-zone digital controllers for improved dynamic response of low harmonic rectifiers. IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 21, No. 1, January 2006. P. 173–181.
8. Chen J., Prodic A., Erickson R. W., Maksimovic D. Predictive digital current programmed control. IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 18, No. 1, January 2003. P. 411–419.
9. Grote T., Schafmeister F., Figge H., Frohlike N., Ide P., Bocker J. Adaptive Digital Slope Compensation for Peak Current Mode Control. Energy Conversion Congress and Exposition, 2009. P. 3523–3529.
10. Zhou C., Jovanovic M. M. Design trade-offs in continuous current-mode controlled boost power-factor-correction circuit. Proceeding of The High Frequency Power Conversion Conference (HFPC). 1992. P. 209–219.
11. Демченко Ю.С. Дослідження роботи пристрою корекції коефіцієнта потужності. Збірник праць IV міжнародної науково-технічної конференції молодих вчених «Електроніка-2011», 29–31 березня, 2011. Київ. Ч.2. С. 159–164.
12. Граничний спосіб керування активними високочастотними коректорами коефіцієнта потужності: пат. 123231 України: МПК H02M1/42, G05F1/70. № u 201703083; заявл. 31.03.2017; опубл. 26.02.2018, Бюл. № 4.

#### ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОРРЕКЦИИ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ

*Для устранения искажений входного тока и расширения диапазона работы корректора предложена схема дополнительной коммутации транзистора. Данная схема дополнительно открывает силовой транзистор, дроссель корректора при этом накапливает энергию, которая после закрытия транзистора отдается в конденсатор, поднимая выходное напряжение. Такой подход позволяет существенно улучшить форму входного тока. Однако схема дополнительной коммутации не позволяет достичь желаемого результата для управления по среднему току. Для данного метода разработан цифровой корректор с упрощенной обратной связью, который устраняет искажения входного тока при существенном увеличении нагрузки и обеспечивает предварительную стабилизацию выходного напряжения корректора. Сравнение предложенного алгоритма с классическим управлением с обратной связью по напряжению показало, что количество вычислений уменьшилась почти вдвое.*

**Ключевые слова:** гармоники тока, корректор коэффициента мощности, схема коммутации, обратная связь, метод управления.

#### EFFICIENCY IMPROVEMENT OF POWER FACTOR CORRECTION

*To eliminate distortion of input current and to expand the range of the corrector, a scheme for additional commutation of the transistor is proposed. This circuit opens a power transistor while the corrector's inductor accumulates energy, which, after the transistor is closed, is sent to the capacitor, raising the output voltage. This approach significantly improves the shape of the input current. However, the scheme for additional commutation does not allow to achieve the desired result for the average current control. For this control method a digital corrector with simplified feedback is developed that eliminates distortion of the input current in case of a significant increase in load and provides a preliminary stabilization of the output voltage. Comparison of proposed algorithm with classical control with voltage feedback showed that the number of calculations decreased almost twice.*

**Key words:** current harmonics, power factor corrector, commutation scheme, feedback, control method.

## ПРИЛАДИ

УДК 504.064, 681.785

*Кватернюк С.М.*

Вінницький національний технічний університет

### МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ КОНТРОЛЬ ПІГМЕНТНИХ ПАРАМЕТРІВ ФІТОПЛАНКТОНУ У ВОДНИХ СЕРЕДОВИЩАХ З ВИКОРИСТАННЯМ КВАДРОКОПТЕРА

*У статті досліджено процес опосередкованого вимірювання пігментних параметрів фітопланктону в приповерхневому шарі водних об'єктів з використанням квадрокоптера з мультиспектральною камерою. Для врахування зміни спектральних характеристик освітлення здійснено нормування результатів вимірювань відносно об'єкта з відомими спектральними характеристиками коефіцієнта дифузного відбиття. У ході множинної регресії отримано регресійні рівняння, що дають змогу визначити пігментні параметри фітопланктону на основі обробки мультиспектральних зображень. Здійснено аналіз похибок вимірювань під час використання в засобі восьмиканальних мультиспектральних камер SMS. Вибрано оптимальні довжини хвиль спектральних каналів і їх кількість за умови забезпечення мінімального значення загальної похибки.*

**Ключові слова:** мультиспектральний метод, водні середовища, спектральні характеристики, пігменти, фітопланктон.

**Постановка проблеми.** Одним із важливих факторів, що негативно впливають на якість поверхневих вод, є їх антропогенне евтрофування, яке полягає у швидкому підвищенні трофності водойм унаслідок надходження до них біогенних елементів та органічних речовин у кількостях, що значно перевищують звичайні природні рівні. Антропогенне евтрофування призводить до надмірного заростання стоячих водойм і масового розвитку синьо-зелених водоростей, які викликають «цвітіння» води. Фітопланктон є одним із біоіндикаторів екологічного статусу водних об'єктів відповідно до Водної рамкової директиви (WFD) ЄС 2000/60 [1, с. 134]. Для гармонізації природоохоронної системи України з міжнародними вимогами необхідно вдосконалювати систему контролю антропогенного забруднення водних середовищ на основі біоіндикації по фітопланктону. Для подальших досліджень у роботі як тест-об'єкт обрано фітопланктон приповерхневого шару водних середовищ, а тест-параметрами – співвідношення між основними пігментними параметрами фітопланктону: хлорофілом а, загальним хлорофілом і каротиноїдами. Для підвищення достовірності контролю параметрів водних середовищ відповідно до завдань екологічного моніторингу з урахуванням їх оптико-фізичних характеристик необхідне вдосконалення мультиспектральних методів контролю та розроблення відповідних апаратно-програмних засобів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Методи мультиспектрального вимірювального контролю посідають важливе місце під час вирішення прикладних задач екологічного моніторингу водних об'єктів. Проте натеper вони розвинуті недостатньо й потребують продовження досліджень з метою підвищення швидкодії та точності. У роботі [2, с. 1] запропоновано спосіб мультиспектрального телевізійного вимірювального контролю екологічного стану водних об'єктів за параметрами фітопланктону з допомогою проточного мультиспектрального телевізійного вимірювального аналізатора частинок неперервної дії, при якому порівнюють зображення частинок на характеристичних довжинах хвиль пігментів за допомогою ПЗЗ-камери із зображеннями з бази даних у режимі реального часу, визначають чисельність частинок фітопланктону та розраховують індекси біорізноманіття. У праці [3, с. 196–205] мультиспектральний метод використовується для дистанційного супутникового екологічного контролю вмісту фітопланктону у водних об'єктах, що дало змогу аналізувати просторовий розподіл концентрації фітопланктону у водних об'єктах з високою роздільною здатністю. У роботі [4, с. 2174] запропоновано алгоритми обробки мультиспектральних зображень, що допомагають підвищити роздільну здатність і з більшою точністю визначити просторовий

розподіл певних пігментів у неоднорідних середовищах. Проведений аналіз наявних оптичних методів контролю параметрів водних середовищ показав їх недосконалість і неспроможність вирішення прикладної задачі для потреб екологічного моніторингу, що зумовило необхідність удосконалення методів і засобів мультиспектрального екологічного вимірювального контролю.

**Постановка завдання.** Метою роботи є підвищення точності вимірювань пігментних параметрів фітопланктону у водних середовищах з використанням квадрокоптера за допомогою мультиспектрального методу.

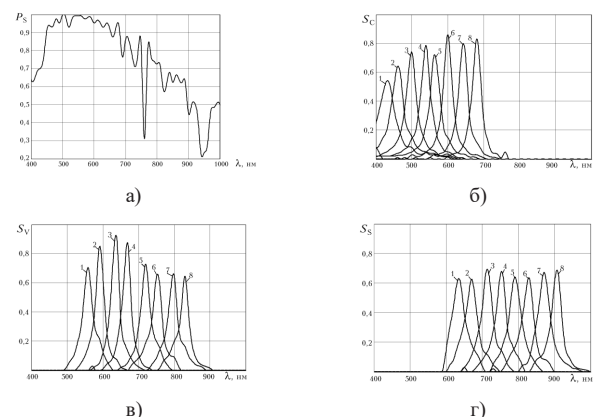
**Виклад основного матеріалу дослідження.** Сутність методу мультиспектрального вимірювального контролю полягає в аналізі цифрових зображень досліджуваного об'єкта, отриманих у декількох спектральних діапазонах [5, с. 988–993]. Після обробки отриманого масиву мультиспектральних зображень необхідно опосередковано виміряти параметри водних середовищ у кожному пікселі зображення. Це здійснюється на основі розв'язання оберненої оптичної задачі з урахуванням математичної моделі неоднорідних водних середовищ. Математичні моделі трансформації світла в приповерхневому шарі водних середовищ урахують концентрації основних пігментів, структурні особливості приповерхневого шару, довжину хвилі падаючого випромінювання і ступінь його поляризації. Метод експериментальних досліджень та екологічного вимірювального контролю на основі обробки мультиспектральних зображень об'єкта отриманих ПЗЗ-камерою на характеристичних довжинах хвиль повинен забезпечувати з високою вірогідністю контроль стану об'єкта та його приповерхневої структури. Координати в мультиспектральному просторі визначаються на основі спектральних характеристик джерел випромінювання, фільтрів, фотоматриці й об'єкта контролю. За умови використання мультиспектральної камери зі світлофільтрами на входах елементів фотоматриці система рівнянь для визначення координат у n-вимірному мультиспектральному просторі буде:

$$\begin{cases} M_1 = \sum_{i=1}^{i_{\max}} P(\lambda_i) s_1(\lambda_i) R_d(\lambda_i) \Delta\lambda, \\ M_2 = \sum_{i=1}^{i_{\max}} P(\lambda_i) s_2(\lambda_i) R_d(\lambda_i) \Delta\lambda, \\ \dots \\ M_n = \sum_{i=1}^{i_{\max}} P(\lambda_i) s_n(\lambda_i) R_d(\lambda_i) \Delta\lambda. \end{cases} \quad (1)$$

де  $P(\lambda_i)$  – спектральна характеристика джерела випромінювання,  $s_i(\lambda_i)$  – спектральна характе-

ристика  $i$ -того каналу мультиспектральної камери,  $R_d(\lambda_i)$  – спектральна характеристика коефіцієнта дифузного відбиття об'єкта дослідження.

Спектральні характеристики коефіцієнта дифузного відбиття на поверхні природного водного середовища розраховані в роботі С.М. Квартенюк [6, с. 15] у малокутовому наближенні для таких параметрів фітопланктону: співвідношення між хлорофілом а та загальним хлорофілом змінюється від 0,8 до 0,9; співвідношення між каротиноїдами та загальним хлорофілом змінюється від 0,2 до 0,4. У кожному з прикладів біомаса фітопланктону 17,7 мг/л, уміст хлорофілу а в сирій масі фітопланктону прийнято 0,5%. Спектральні характеристики показника поглинання, показника розсіювання та фактору анізотропії для водного середовища без фітопланктону, але з наявністю завислих частинок органічного походження введено в математичну модель за допомогою апроксимації за результатами експериментальних досліджень. Як джерело випромінювання використовується природне сонячне випромінювання, усереднена спектральна характеристика щільності випромінювання якого з урахуванням поглинання в атмосфері наведена на рис. 1а. У засобі мультиспектрального екологічного контролю використано восьмиканальні мультиспектральні камери серії CMS (Silios Technologies, Франція) з такими параметрами [7, с. 1–5]: спектральний діапазон CMS-C 400–700 нм, CMS-V 550–850 нм, CMS-S 650–950 нм; роздільна здатність спектральних каналів 426 x 339; розрядність АЦП 10 біт; час експозиції від 10 мкс до 2 с; вага 59 г. Спектральна характеристика чутливості мультиспектральних камер серії CMS наведена на рис. 1 б–г.



**Рис. 1. Нормовані спектральні характеристики: а) природного сонячного випромінювання; б) чутливості спектральних каналів камери CMS-C; в) чутливості спектральних каналів камери CMS-V; г) чутливості спектральних каналів камери CMS-S**



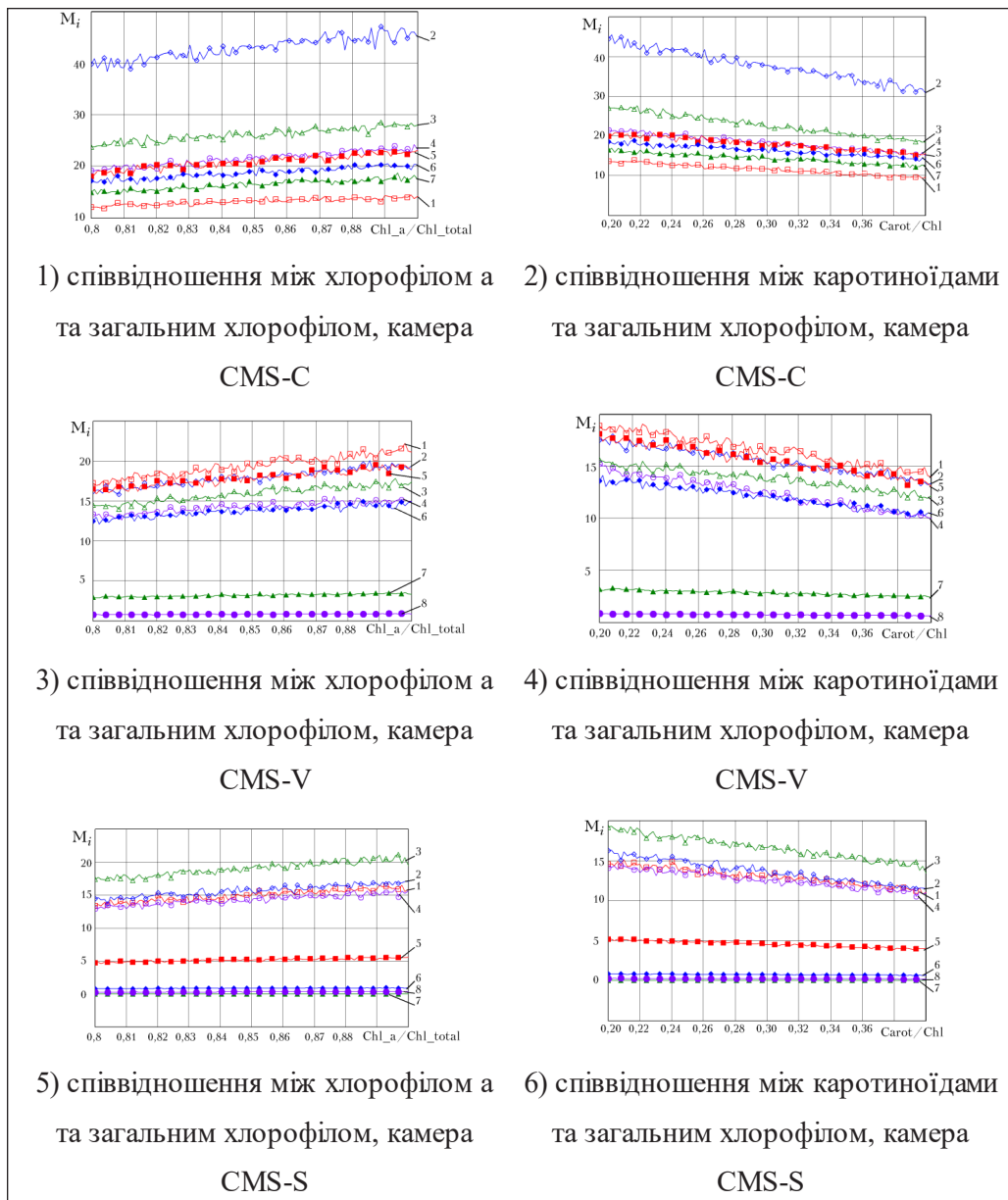


Рис. 2. Залежності мультиспектральних параметрів у разі зміни пігментних параметрів і використання мультиспектральних камер серії CMS

Результати розрахунку мультиспектральних параметрів за відомими спектральними характеристиками в разі зміни пігментних параметрів фітопланктону й використання восьмиканальних мультиспектральних камер серії CMS різних типів наведено на рис. 2. Оскільки спектральні характеристики природного сонячного випромінювання на рівні водної поверхні постійно змінюються, то необхідно здійснювати нормування результатів мультиспектральних вимірювань з квадрокоптера відносно плаваючої платформи з білою дифузно відбиваючою поверхнею з покриттям на основі сульфату барію. Для опосередкованого

вимірювання біомаси фітопланктону за результатами мультиспектральних вимірювань використовуються лише нормовані значення мультиспектральних параметрів.

Розв'язання оберненої оптичної задачі для визначення пігментних параметрів фітопланктону у водних середовищах за результатами мультиспектральних вимірювань проведемо за допомогою множинної регресії в програмі STATISTICA 6.0. З використанням покрокової регресії проаналізуємо мультиспектральні параметри, що дають змогу найбільш точно визначити пігментні параметри фітопланктону Приклад результатів

Результати розрахунку множинної регресії

№ з/п	$\lambda$ , нм	F	$\delta m$ , %	R
1	713	661,6065	1,0579329	0,93326622
2	713, 669	655,1362	0,7772548	0,96492090
3	713, 669, 790	673,2844	0,6338839	0,97705078
4	713, 669, 790, 752	681,3346	0,5490373	0,98301378
5	713, 669, 790, 752, 827	644,5145	0,5062998	0,98572688
6	713, 669, 790, 752, 827, 906	604,4872	0,4780634	0,98742062
7	713, 669, 790, 752, 827, 906, 635	522,2490	0,4762857	0,98764968

розрахунку множинної регресії для опосередкованого вимірювання співвідношення між хлорофілом а та загальним хлорофілом фітопланктону за результатами мультиспектральних вимірювань при використанні камери типу CMS-C наведено в таблиці 1.

У ході множинної регресії для опосередкованого вимірювання співвідношення між хлорофілом а та загальним хлорофілом фітопланктону у водному середовищі при використанні мультиспектральних камер серії CMS отримано такі регресійні рівняння:

$$Chl\_a / Chl_{CMS\_C} = 0,287843623 + 0,209036M_{C\_4\_536} + 0,195614M_{C\_5\_563} + 0,149845M_{C\_7\_642} + 0,140127M_{C\_6\_600} + 0,110152M_{C\_1\_430} + 0,133364M_{C\_2\_461} + 0,112934M_{C\_3\_499}, \quad (2)$$

$$Chl\_a / Chl_{CMS\_V} = 0,299045340 + 0,185920M_{V\_2\_593} + 0,217010M_{V\_1\_560} + 0,153637M_{V\_5\_719} + 0,128180M_{V\_7\_795} + 0,111973M_{V\_8\_829} + 0,157482M_{V\_3\_635} + 0,087702M_{V\_6\_752}, \quad (3)$$

$$Chl\_a / Chl_{CMS\_S} = 0,236112976 + 0,198943M_{S\_3\_713} + 0,190275M_{S\_2\_669} + 0,173474M_{S\_5\_790} + 0,148602M_{S\_4\_752} + 0,134188M_{S\_6\_827} + 0,144415M_{S\_8\_906} + 0,063497M_{S\_1\_635} \quad (4)$$

де  $Chl\_a / Chl_{CMS\_C}$ ,  $Chl\_a / Chl_{CMS\_V}$ ,  $Chl\_a / Chl_{CMS\_S}$  – співвідношення між хлорофілом а та загальним хлорофілом фітопланктону, визначене за допомогою мультиспектральних камер CMS-C, CMS-V, CMS-S;  $M_{i,j,k}$  – мультиспектральні параметри для камери і-того типу, j-того спектрального каналу, k-того значення довжини хвилі в нм.

У ході множинної регресії для опосередкованого вимірювання співвідношення між каротиноїдами та загальним хлорофілом фітопланктону у водному середовищі при використанні мультиспектральних камер серії CMS отримано такі регресійні рівняння:

$$Carot / Chl_{CMS\_C} = 0,904790007 - 0,195685M_{C\_3\_499} - 0,185798M_{C\_2\_461} - 0,180862M_{C\_1\_430} - 0,092616M_{C\_6\_600} - 0,123390M_{C\_5\_563} - 0,108316M_{C\_7\_642} - 0,129950M_{C\_4\_536}, \quad (5)$$

$$Carot / Chl_{CMS\_V} = 0,990208189 - 0,189790M_{V\_4\_669} - 0,147313M_{V\_1\_560} - 0,143672M_{V\_6\_752} - 0,119588M_{V\_8\_829} - 0,132849M_{V\_5\_719} - 0,122272M_{V\_7\_795} - 0,098624M_{V\_2\_593} - 0,064820M_{V\_3\_635}, \quad (6)$$

$$Carot / Chl_{CMS\_S} = 0,976892083 - 0,208828M_{S\_3\_713} - 0,212616M_{S\_2\_669} - 0,115506M_{S\_5\_790} - 0,172868M_{S\_4\_752} - 0,159507M_{S\_6\_827} - 0,147343M_{S\_8\_906}, \quad (7)$$

де  $Carot / Chl_{CMS\_C}$ ,  $Carot / Chl_{CMS\_V}$ ,  $Carot / Chl_{CMS\_S}$  – співвідношення між каротиноїдами та загальним хлорофілом фітопланктону, визначене за допомогою мультиспектральних камер CMS-C, CMS-V, CMS-S;  $M_{i,j,k}$  – мультиспектральні параметри для камери і-того типу, j-того спектрального каналу, k-того значення довжини хвилі в нм.

Інструментальний складник похибки вимірювань при використанні цифрових камер зумовлений наявністю шумів і випадкових завад у камері, а також похибкою квантування й визначаються за формулами, наведеними в роботі С.М. Кватернюк [8, с. 9–16]. Для мультиспектральних камер серії CMS зі співвідношенням сигнал/шум 60 дБ похибка, зумовлена наявністю шумів і випадкових завад у камері, становитиме 0,1%. Середньоквадратичне значення похибки квантування для камери з розрядністю АЦП 10 біт становитиме 0,014%. При цьому інструментальний складник похибки в кожному зі спектральних каналів становитиме 0,101%.

Інструментальний складник похибки мультиспектральних вимірювань визначається складниками похибки вимірювання в кожному зі спектральних каналів [9, с. 97]:

**Аналіз похибок мультиспектральних вимірювань пігментних параметрів  
фітопланктону у водних середовищах**

N	$\delta_{instr.}, \%$	CMS-C		CMS-V		CMS-S	
		$\delta_m, \%$	$\delta_{gen}, \%$	$\delta_m, \%$	$\delta_{gen}, \%$	$\delta_m, \%$	$\delta_{gen}, \%$
Співвідношення між хлорофілом а та загальним хлорофілом фітопланктону							
1	0,175	0,897	1,072	0,849	1,024	1,058	1,233
2	0,247	0,658	0,905	0,64	0,887	0,777	1,024
3	0,303	0,562	0,865	0,539	0,842	0,634	0,937
4	0,35	0,529	0,879	0,51	0,86	0,549	0,899
5	0,391	0,503	0,894	0,482	0,873	0,506	0,897
6	0,428	0,476	0,904	0,459	0,887	0,478	0,906
7	0,463	0,459	0,922	0,449	0,912	0,476	0,939
Співвідношення між каротиноїдами та загальним хлорофілом фітопланктону							
1	0,175	0,981	1,156	1,062	1,237	1,161	1,336
2	0,247	0,695	0,942	0,791	1,038	0,805	1,052
3	0,303	0,575	0,878	0,673	0,976	0,668	0,971
4	0,35	0,528	0,878	0,616	0,966	0,592	0,942
5	0,391	0,5	0,891	0,568	0,959	0,533	0,924
6	0,428	0,471	0,899	0,533	0,961	0,5	0,928

$$\delta_{instr.} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \delta_{rand.Mi}^2 + 2 \sum_{i=1}^N \sum_{j<i} R_{ij} \delta_{rand.Mi} \delta_{rand.Mj}}, \quad (8)$$

де  $\delta_{rand.Mi}$ ,  $\delta_{rand.Mj}$  – випадкова складова похибки в  $i$ -тому й  $j$ -тому каналі;  $R_{ij}$  – коефіцієнт кореляції між мультиспектральними параметрами, отриманими після множинної регресії;  $N$  – загальна кількість каналів.

Загальна похибка вимірювань пігментних параметрів фітопланктону буде визначатись сумою інструментальної й методичної похибок:

$$\delta_{gen} = \delta_{instr.} + \delta_m. \quad (9)$$

Розраховані значення інструментального складника похибки мультиспектральних вимірювань пігментних параметрів фітопланктону у водних середовищах, значення методичного складника похибки, визначені за результатами розрахунку множинної регресії для різних камер серії CMS, і загальна похибка вимірювань наведені в таблиці 2. Зі зростанням кількості спектральних каналів інструментальний складник похибки вимірювань зростає, а методичний – зменшується. Оптимальну кількість спектральних каналів і їх довжини хвиль можна обрати за умови забезпечення мінімального значення загальної похибки.

Під час вимірювання співвідношення між хлорофілом а та загальним хлорофілом фітопланктону за допомогою мультиспектральної камери мінімальну загальну похибку отримано для триканального засобу вимірювального

контролю з використанням камери типу CMS-C і робочих довжин хвиль 536, 563 та 642 нм. Під час вимірювання співвідношення між каротиноїдами та загальним хлорофілом фітопланктону мінімальну загальну похибку отримано для триканального засобу з використанням камери типу CMS-C і робочих довжин хвиль 499, 461 і 430 нм.

**Висновки.** У статті вдосконалено метод екологічного контролю пігментних параметрів фітопланктону в приповерхневому шарі природних водних середовищ під час вимірювань в умовах *in situ* з використанням квадрокоптера з мультиспектральною камерою. Здійснено розв'язок оберненої оптичної задачі для визначення пігментних параметрів фітопланктону в природних водних середовищах за результатами мультиспектральних вимірювань при використанні восьмиканальних мультиспектральних камер серії CMS (Silios Technologies) та отримано відповідні регресійні рівняння. У процесі порівняння значення методичної похибки вимірювання пігментних параметрів фітопланктону для камер цієї серії, що працюють у різних діапазонах довжин хвиль, найменше значення отримано для камери, що працює в діапазоні 400–700 нм (CMS-C). Обрано оптимальні довжини хвиль спектральних каналів і їх кількість під час опосередкованого вимірювання пігментних параметрів фітопланктону за умови забезпечення мінімального значення загальної похибки.

**Список літератури:**

1. Водна рамкова директива ЄС 2000/60/ЄС. Основні терміни та їх визначення: Вид. офіційне. Київ: Твій формат, 2006. 240 с.
2. Спосіб мультиспектрального телевізійного вимірювального контролю екологічного стану водних об'єктів за параметрами фітопланктону: пат. 99580 Україна: МПК G01N 21/21 (2006.01). № u201500058; заява 05.01.2015; опубл. 10.06.2015, Бюл. № 11. 5 с.
3. Kudela R.M., Palacios S.L., Austerberry D.C. et al. Application of hyperspectral remote sensing to cyanobacterial blooms in inland waters. *Remote Sensing of Environment*. 2015. V. 167. P. 196–205.
4. Starovoitov V., Makarau A., Zakharov I. et al. Multispectral image enhancement based on fusion and super-resolution. *15th European Signal Processing Conference, Poland, Poznan*. 2007. P. 2174–2178.
5. Martsenyuk V., Petruk V.G., Kvaternyuk S.M. et al. Multispectral control of water bodies for biological diversity with the index of phytoplankton. *16th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS 2016), Korea, Gyeongju 2016*, P. 988–993.
6. Кватернюк С.М. Дослідження впливу пігментних параметрів на спектральні характеристики природних водних середовищ для задач екологічного контролю. *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології*. 2017. № 2. С. 15–19.
7. CMS: Multi-spectral camera. Product Manual [Electronic resource]. URL: <https://www.silios.com/download> (дата звернення: 24.07.2018).
8. Кватернюк С.М. Контроль екологічної безпеки стічних вод за допомогою мультиспектрального методу та біоіндикації по фітопланктону. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2017. № 6. С. 9–16.
9. Денисенко В. Суммирование погрешностей измерений в системах автоматизации. *Современные технологии автоматизации*. 2012. № 1. С. 92–100.

**МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНИЙ ЕКОЛОГІЧЕСЬКИЙ КОНТРОЛЬ ПІГМЕНТНИХ ПАРАМЕТРОВ ФІТОПЛАНКТОНА В ВОДНИХ СРЕДАХ С ІСПОЛЬЗОВАННЯМ КВАДРОКОПТЕРА**

*В статті досліджено процес косвенного вимірювання пігментних параметрів фітопланктону в приповерхневому шарі водних об'єктів з використанням квадрокоптера та мультиспектральної камери. Для урахування змін спектральних характеристик освітлення здійснено нормування результатів вимірювань відносно об'єкта з відомими спектральними характеристиками коефіцієнта дифузного відбиття. В ході множинної регресії отримано регресійні рівняння, що дозволяють визначити пігментні параметри фітопланктону на основі обробки мультиспектральних зображень. Здійснено аналіз погрешностей вимірювань при використанні в середстві восьмиканальних мультиспектральних камер CMS. Вибрано оптимальні довжини хвиль спектральних каналів та їх кількість з умов забезпечення мінімального значення загальної погрешності.*

**Ключевые слова:** мультиспектральний метод, водні середовища, спектральні характеристики, пігменти, фітопланктон.

**MULTISPECTRAL ECOLOGICAL CONTROL OF PIGMENT PARAMETERS OF PHYTOPLANKTON IN AQUEOUS MEDIA USING QUADROCOPTER**

*The process of indirect measurement of pigment parameters of phytoplankton in the near-surface layer of water objects using a quadrocopter with multispectral camera was studied. In order to take into account the change in the spectral characteristics of the illumination, the results of measurements with respect to the object with known spectral characteristics of the diffuse reflection coefficient are normalized. In the course of multiple regression, regression equations were obtained that allow to determine the pigment parameters of phytoplankton on the basis of processing of multispectral images. The analysis of errors of measurements is carried out at use in the means of eight-channel multispectral CMS cameras. Optimal wavelengths of spectral channels and their number are selected from the condition of ensuring a minimum value of the total error.*

**Key words:** multispectral method, aqueous media, spectral characteristics, pigments, phytoplankton.

УДК 615.47

**Кравченко А.Ю.**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Терещенко М.Ф.**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## ТЕРАПЕВТИЧНІ АПАРАТИ ДЛЯ ЛІКУВАННЯ АРТРОЗУ ГОМІЛКОВО-СТУПНЕВОГО СУГЛОБУ УЛЬТРАЗВУКОМ

У статті розглянуті проблеми поширеності в Україні такої хвороби, як деформуючий артроз гомілково-ступневого суглобу (на основі даних державної статистики), і терапевтичні апарати для лікування цієї хвороби за допомогою ультразвуку – апарати ультразвукової терапії, як вітчизняного, так й іноземного виробництва. Подані дані щодо принципів побудови, які використовуються в розробці нових апаратних рішень ультразвукової терапії.

**Ключові слова:** ультразвук, ультразвукова терапія, апарати ультразвукової терапії, артроз гомілково-ступневого суглобу.

**Постановка проблеми.** На частину хвороб суглобів припадає близько третини всіх кістково-м'язових порушень, 55% із яких становить деформуючий артроз гомілково-ступневого суглобу (далі – ДАГС). Як зазначено в роботі [1], захворювання ДАГС клінічно визначено більше ніж у 10–20% населення світу [1]. Статистичні дані щодо захворюваності на хвороби кістково-м'язової системи в Україні станом на 2015 р. наведено нижче. Кількість уперше зареєстрованих випадків: загалом (1 245 523), діти віком 0–14 років включно (143 758) – 11,5%, діти віком 15–17 років включно (54 563) – 4,5%, особи віком 18 років і старші (1 047 202) – 84%, з них – особи віком (18–54 роки), жінки та чоловіки (18–59 років) (675 657) – 54,3%, жінки – 55 років і старші, чоловіки – 60 років і старші (371 545) – 29,8% [2]. Захворювання ДАГС розвивається головним чином у людей працездатного віку й посідає перше місце серед причин інвалідності у віддаленому періоді після травм, а серед усіх артрозів – третє місце після ураження колінного та кульшового суглобів [3]. За тяжких форм цієї хвороби у хворих виникає значне зниження якості життя, обмеження повсякденної і трудової діяльності [4]. Також відомо, що частота вегето-судинних розладів, гемодинамічних порушень та астенічних проявів має залежність від ступеня тяжкості захворювання ДАГС. Так, синдром вегето-судинної дистонії й астенічний достовірно частіше зустрічались у хворих із наслідками легкого захворювання ДАГС. Гемо-

динамічні порушення достовірно частіше виявлялись у групі хворих середньої ступені тяжкості ДАГС [1].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Загальновідомим серед спеціалістів медичної галузі є те, що для розвитку остеоартрозу мають значення фактори передумови – спадкові та набуті. Серед спадкових факторів особливе значення надають генетично-детермінованому порушенню метаболізму в суглобовому хрящі. Серед набутих факторів провідну роль відіграє механічна травма [5]. А саме щодо захворювання ДАГС: переломи із неліквідованими підвивихами, вивихи стопи (особливо відкриті), переломи таранної кістки, вогнепальні поранення, хронічні травми (спортсмени, артисти балету), виражені деформації вищеназваних сегментів кінцівок тощо [6]. Відповідно до клініко-морфологічних проявів, розрізняють 3 стадії остеоартрозу. На I стадії відмічаються болі в суглобах при навантаженні й рентгенологічно виявляють звуження суглобової щілини та остеофіти. На II стадії болі в суглобах стають постійними, звуження суглобової щілини й розвиток остеофітів при рентгенологічному обстеженні більш виражені. На III стадії разом із постійними суглобовими болями відмічається функціональна недостатність суглобів у зв'язку з розвитком субхондрального склерозу [5]. Хвороба розвивається поступово, відмічається легкий хруст у суглобі під час руху, зниження рухливості після стану спокою, особливо зранку. У міру прогресування хвороби

виникають болі під час стояння та ходьби, особливо в процесі спускання сходами. Характерний симптом – «блокади» суглобу. При тяжких формах виникає деформація суглобу, атрофія м'язів, м'язово-сухожильні контрактури [7]. Лікування на початкових стадіях проводиться амбулаторно. Під час лікування ДАГС, як і при інших локалізаціях хвороби, медичні засоби застосовують для покращення кровообігу в навколосуглобових тканинах, зменшення больового синдрому, відновлення достатньої рухливості в суглобі й запобігання контрактурам. Із рекомендацій необхідне зниження навантаження на хворий суглоб. Для лікування активно використовують засоби фізіотерапії: масаж, лікувальну фізкультуру, теплові процедури, електрофорез лікарських засобів, діадинамотерапію, магнітотерапію, лазеротерапію, ультразвукову терапію [6; 8]. Найбільш ефективна – ультразвукова терапія. При цьому актуальним залишається питання щодо вибору відповідного ультразвукового апаратного забезпечення для лікування вищеназваної хвороби.

**Постановка завдання.** Метою роботи є огляд та аналіз сучасних апаратів ультразвукової терапії, що застосовуються для лікування деформуючого артрозу гомілково-ступневого суглобу, і надання пропозицій стосовно перспективної структурної схеми апарату з елементами адаптивного контролю стану пацієнта під час процедури.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Під час проведення ультразвукової терапії на організм людини діють три фактори: механічний, тепловий і фізико-хімічний. Дія всіх трьох факторів тісно взаємопов'язана. У формуванні відповідних реакцій організму беруть участь і рефлекторні механізми (нейрогенний фактор). Біологічна дія ультразвуку залежить від інтенсивності дози, котра може бути для тканин стимулюючою або ж седативною. Найбільш адекватними для лікувально-профілактичних впливів, у фізіотерапії під час лікування цієї хвороби є невеликі дозування ультразвуку (до  $1,2 \text{ Вт/см}^2$ ). Вони здатні викликати знеболюючу, антиспастичну, судиннорозширювальну, розсмоктувальну, протизапальну, десенсибілізуювальну дію. При застосуванні ультразвуку (далі – УЗ) в зоні впливу активується крово- й лімфообіг, підвищується фагоцитоз, активуються механізми загальної та імунної реактивності організму, прискорюються процеси репаративної регенерації, стимулюються функції ендокринних органів, передусім наднирників. УЗ має деполімеризуючу й розволокнюючу

дію на ущільнену склерозовану тканину, у зв'язку з чим він успішно використовується під час лікування контрактур суглобів. УЗ підвищує судинну та епітеліальну проникність, що стало рушійним фактором для сукупного застосування його з лікувальними речовинами (ультрафонофорез). Можна сказати, що зміни, які відбуваються під впливом ультразвуку з боку різних органів і систем, мають компенсаторно-адаптивний характер і зумовлюють підвищення неспецифічної резистентності організму, його стійкості до негативних факторів зовнішнього середовища [9].

У фізіотерапевтичній практиці для ультразвукової терапії (далі – УЗТ) використовуються апарати як вітчизняного виробництва, так й іноземних виробників. Нижче наведено окремі, найбільш оптимальні апарати, що застосовуються для УЗТ ДАГС в умовах лікувально-профілактичних закладів (далі – ЛПЗ). Цей перелік не є вичерпним, може поповнюватись разом із випуском нових фізіотерапевтичних апаратів у різних країнах.

1. Країна – Російська Федерація.

1.1. Підприємство – «МедТеКо».

1.1.1. Апарат ультразвукової терапії «УЗТ».



Рис. 1. Апарат «УЗТ», виробник – «МедТеКо»

Апарат випускається в трьох модифікаціях:

- 1) двочастотний «УЗТ-1.3.01Ф» – генерація УЗ-коливань на двох частотах – 0,88 і 2,64 МГц;
- 2) одночастотний «УЗТ-1.01Ф» – генерація УЗ-коливань на частоті 0,88 МГц;
- 3) одночастотний «УЗТ-3.01Ф» – генерація УЗ-коливань на частоті 2,64 МГц.

Відмінні особливості:

- Сучасна елементна база;
- Зручне меню управління й контролю з рідкокристалічним дисплеєм;
- Наявність контролю контакту з тілом пацієнта [10].

1.2. Підприємство «Метромед» НВП.

1.2.1. Апарат комплексного впливу контрастними температурами і фонофорезом «ПРОЛОНГ-ММ».



Рис. 2. Апарат «ПРОЛОНГ-ММ»

Апарат «ПРОЛОНГ-ММ» призначений для профілактики й лікування захворювань опорно-рухового апарату та інших захворювань шляхом впливу на патологічний осередок комплексом фізичних і фізико-хімічних факторів, що включають контрастні температури, цільові лікарські речовини і низькочастотний ультразвук. Робоча частота акустичних коливань випромінюючого торця ультразвукових аплікаторів становить 44 кГц [11].

2. Країна – Чеська Республіка.

2.1. Підприємство – BTL Medical technologies.

2.1.1. Серія ультразвукових апаратів BTL-5000.

Серія ультразвукових апаратів BTL-5000 використовує один і два незалежні ультразвукові канали. Ультразвукові випромінювачі багаточастотні й поставляються у двох розмірах, а також мають можливість акустичного контролю зони контакту випромінювача з біологічною тканиною.

Апарат «BTL-5710 SONO»



Рис. 3.

Апарат «BTL-5710 SONO»

Особливості:

- 1-канальна ультразвукова система;
- Спільне використання 2 ультразвукових випромінювачів;
- Великий 8.4" кольоровий сенсорний екран;
- Протоколи прийому й терапевтична енциклопедія;
- База даних пацієнтів.

Апарат «BTL-5720 SONO»



Рис. 4. Апарат «BTL-5720 SONO»

Особливості:

- 2 канали ультразвукового впливу;
- Модульна система побудови апарату;
- До чотирьох видів лікувального впливу в одному блоці;
- Протоколи прийому й терапевтична енциклопедія;
- Великий кольоровий сенсорний екран.

2.1.2. Серія апаратів BTL-4000 Smart & Premium.

Апарати BTL-4000 Smart & Premium мають ультразвукову систему Hands Free Sono®, що економить час оператора, роблячи процедуру ультразвукової терапії значно ефективнішою для роботи персоналу ЛПЗ.

Апарат «BTL-4000 PREMIUM»



Рис. 5. Апарат «BTL-4000 PREMIUM»

Особливості:

- Аплікатор Hands Free Sono®;
- Швидкі протоколи;
- Ультразвуковий вплив із частотами 1 і 3 МГц;
- Великий 7" кольоровий сенсорний екран;
- Протоколи прийому й терапевтична енциклопедія;
- База даних пацієнтів;
- Підігрів ультразвукового випромінювача;
- Портативний.

Апарат «BTL-4000 SMART»



Рис. 6. Апарат «BTL-4000 SMART»

Особливості:

- Аплікатор Hands Free Sono®;
- Ультразвуковий вплив із частотами 1 і 3 МГц;
- 4.3" кольоровий сенсорний екран;
- Протоколи прийому й терапевтична енциклопедія;

- База даних пацієнтів;
- Підігрів ультразвукового випромінювача;
- Портативний.

Технологія BTL Hands Free Sono® полягає у створенні можливості обертання ультразвукового поля без переміщення самого випромінювача відносно тіла пацієнта, без участі оператора. Ця технологія дає змогу економити робочий час і сили оператора апарату.



Рис. 7. Принцип роботи випромінювача з технологією Hands Free Sono® (зліва) і звичайного випромінювача, яким рухає оператор (справа)

Технологія обертання ультразвукового поля заснована на використанні багатокристалльних випромінювачів. Кристали п'єзоелементів організовані в масив ультразвукових датчиків, які управляються за допомогою блоку процесора реального часу. У реальному масштабі часу процесор активує окремі кристали відповідно до попередньо встановлених параметрів. Обертання ультразвукового поля створюється за рахунок послідовної активації кристалів, тоді як у режимі реального часу процесор керує швидкістю обертання, вихідною потужністю і глибиною проникнення ультразвукового поля для кожного окремого кристалу. Такий точний контроль робить ультразвукову терапію ефективною й безпечною

від будь-яких ризиків, таких як виникнення «гарячих точок», характерних для деяких стаціонарних ультразвукових технологій.



Рис. 8. Принцип застосування випромінювача з технологією Hands Free Sono®

### 2.1.3. Апарат «BTL-4000 Professional».



Рис. 9. Апарат «BTL-4000 Professional»

Особливості:

- 1 канал ультразвукового впливу;
- Спільне використання 2 ультразвукових випромінювачів;
- Цифровий графічний дисплей;
- Протоколи прийому й терапевтична енциклопедія;
- Портативний [12].

### 3. Країна – США.

#### 3.1. Корпорація «CHATTANOGA GROUP».

##### 3.1.1. Апарат ультразвукової терапії «Intellect TranSport® Ultrasound».



Рис. 10. Апарат «Intellect TranSport® Ultrasound»



Технічні характеристики апаратів УЗТ

№	Назва апарату	Назва виробника	Країна-виробник	Робоча частота УЗ, кГц	Потужність УЗ, Вт/см <sup>2</sup>	Частота модуляції, Гц
1	«УЗТ»	«МедТеКо»	Росія	880, 2640	0,05–1,0	50
2	«ПРОЛОНГ-ММ»	«Метромед»	Росія	44	0,05–1	50
3	«BTL-5710»	«BTL Medical technologies»	Чеська Республіка	1000, 3000	2–3	10–150
4	«BTL-5720 SONO»	«BTL Medical technologies»	Чеська Республіка	1000, 3000	2–3	10–150
5	«BTL-4000 PREMIUM»	«BTL Medical technologies»	Чеська Республіка	1000, 3000	2–3	10–150
6	«BTL-4000 SMART»	«BTL Medical technologies»	Чеська Республіка	1000, 3000	2–3	10–150
7	BTL-4000 Professional	«BTL Medical technologies»	Чеська Республіка	1000, 3000	2–3	10–150
8	«Intellect TranSport® Ultrasound»	«CHATTANOGA GROUP»	США	1000, 3300	2,5–3	100
9	«Sonostat»	«gbo Medizintechnik AG»	Німеччина	1000, 3300	0,1–3	100
10	«Sonostat 133»	«gbo Medizintechnik AG»	Німеччина	1000, 3300	0–3	100
11	«MIT-11»	НМЦ «Мединтех»	Україна	44; 880	0,2–1,5	0–99

Портативний апарат ультразвукової терапії, що дає змогу вибрати частоту впливу 1 або 3,3 МГц без зміни аплікаторів.

Особливості:

- Портативний апарат;
- Автоматичне калібрування системи до будь-якого розміру ультразвукового випромінювача;
- Ергономічні аплікатори;
- Підігрів випромінювача;
- LCD дисплей;
- Протоколи користувача [13].

4. Країна – Німеччина.

4.1. Концерн «gbo Medizintechnik AG».

4.1.1. Апарат ультразвукової терапії «Sonostat».



Рис. 11. Апарат «Sonostat»

Апарат ультразвукової терапії «Sonostat®» з робочими частотами 1 МГц і 3,3 МГц призначе-

ний для лікування в загальній фізіотерапевтичній практиці. Робоча частина випромінювача виготовлена зі сплавів титану, який є біологічно інертним, і не викликає шкірних реакцій у пацієнтів із чутливою шкірою, не тьмяніє з часом під час експлуатації. Інтенсивність ультразвуку: 0–3 Вт/см<sup>2</sup> (1 МГц), 0–1,5 Вт/см<sup>2</sup> (3,3 МГц). Система має кілька режимів роботи. Є безперервний режим і також п'ять імпульсних режимів, що доступні, з факторами заповнення імпульсів 100%, 50%, 30%, 20%, 10% і 5%. Як альтернатива установці параметрів лікування вручну кожен раз користувач може або вибрати з меню, або з набору попередніх параметрів.

4.1.2. Апарат УЗТ «Sonostat 133».



Рис. 12. Апарат «Sonostat® 133»

Апарат УЗТ «Sonostat® 133» має різні частоти впливу (1 і 3 МГц). Ультразвук передається через ергономічні й водонепроникні робочі частини

випромінювача площами 2,5 см<sup>2</sup> або 5 см<sup>2</sup>. Робочі частини виконані з титану. Обидва типи випромінювачів можуть використовуватися для обох частот. Необхідна робоча частота може бути обрана на панелі управління [14].

5. Країна – Україна.

5.1. Підприємство – НМЦ «Мединтех».

5.1.1. Апарат фізіотерапевтичний «МІТ-11».

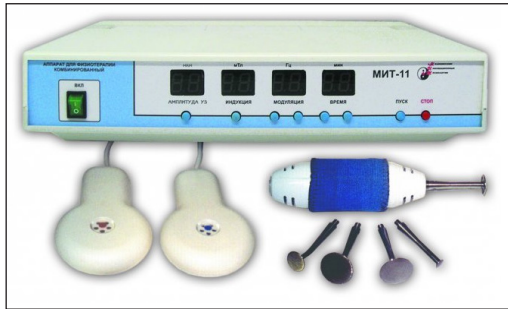


Рис. 13. Апарат «МІТ-11»

Фізіотерапевтичний апарат «МІТ-11» призначений для лікування пацієнтів з використанням низькочастотного або середньочастотного ультразвуку та імпульсного магнітного поля в поєднанні з оптичним потоком червоного й інфрачервоного (або синього) спектру. Апарат призначений для застосування в медичних лікувальних установах, санаторіях і лікувально-профілактичних комплексах. Магнітне поле в поєднанні з оптичним потоком володіє яскраво вираженою протипольовою та протинабряковою дією.

Технічні характеристики:

- Робоча частота ультразвукового генератора: 44 (880) кГц;
- Довжина хвилі оптичного потоку в червоному діапазоні спектру – 0,67 мкм;
- В інфрачервоному діапазоні спектру – 0,78 мкм;
- Гранична потужність оптичного потоку:
- Червоного (синього) спектру – 25 мВт;
- Інфрачервоного спектру – 100 мВт;
- Таймер часу контролює тривалість процедури – від 1 до 99 хв.;
- Вага електронного блоку – максимум 5 кг, вага апарату з індуктором і випромінювачем – максимум 6 кг [15].

Технічні характеристики всіх вищеописаних апаратів зведені в таблиці 1.

Ультразвукова терапія успішно застосовується для апаратного лікування ДАГС.

На основі досліджень пропонується вдосконалити спосіб ультразвукової терапії шляхом використання в апаратах принципів адаптивного керування. Тобто створення систем, котрі автоматично

визначають потрібний закон управління фізіотерапевтичним апаратом за допомогою аналізу поведінки біологічних систем, тканин та організму загалом за поточним управлінням. Динамічні параметри біологічних тканин та організму людини не залишаються незмінними в часі протягом проведення терапії й під час зміни параметрів лікувального впливу [16].

Адаптивні системи керування бувають пошуковими та безпошуковими. Безпошукові системи керування засновані на спробі використання позитивних властивостей принципу зворотного зв'язку: на відміну від пошукових адаптивних систем, у них не відшуковується, а апріорно задається показник, котрий бажано мати незмінним (або змінним відповідним чином), за рахунок цілеспрямованої зміни параметрів або структури регулятора у випадку непередбачуваної зміни математичної моделі об'єкта й зовнішніх впливів. Як такі показники мають виступати характеристики системи керування, що визначають її функціональну працездатність. Таким показником може бути й один суттєвий комплексний показник [17]. Знаючи бажаний показник роботи системи керування й вимірюючи реальний поточний показник, можна їх порівнювати, ввести міру їх неузгодження, і, як у принципі зворотного зв'язку, зводити цю міру неузгодження до нуля чи до мінімально допустимої величини [18].

Для реалізації адаптивного принципу керування фізіотерапевтичним апаратом пропонується побудова системи адаптивного керування, основні компоненти якої схематично зображені на рис. 14 [19].

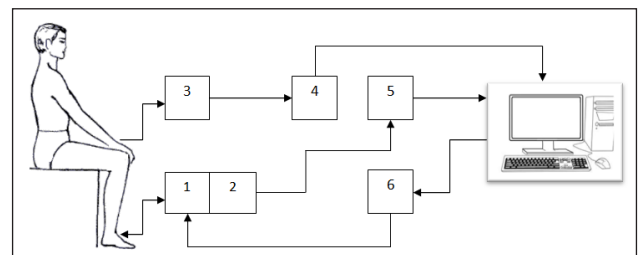


Рис. 14. Структурна схема системи адаптивного керування фізіотерапевтичним апаратом

Випромінювач ультразвуку 1 доповнений конструктивно датчиками температури 2, які через аналого-цифровий перетворювач 5 передають інформацію про температуру на поверхні шкіри в зоні впливу ультразвуку та про загальну температуру тіла пацієнта на комп'ютер. На верхній кінцівці людини вдягнений пульсоксиметр 3, який за допомогою узгоджувального блоку 4 передає інформацію про частоту серцевих скорочень на

комп'ютер. На самому комп'ютері міститься програмне забезпечення, що виконує адаптивне керування апаратом ультразвукової терапії 6.

Нами розроблено дослідний зразок такого адаптивного апарату УЗТ (рис. 15), який виконує частину функцій, описаних до схеми рис. 14.

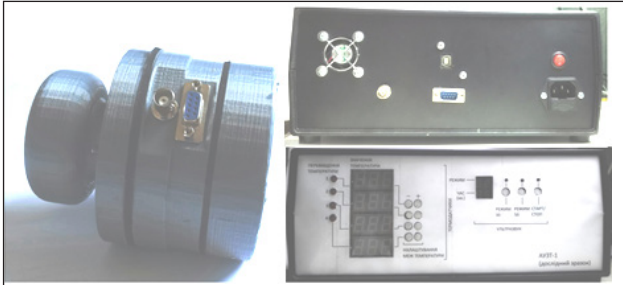


Рис. 15. Дослідний зразок адаптивного апарату УЗТ

Цей дослідний зразок адаптивного апарату УЗТ (рис. 15) містить у своєму складі основний блок (що включає в себе УЗ генератор, блок живлення та інші складники) та випромінювач. УЗ випромінювач розроблено із застосуванням конструкції й принципів роботи, описаних у роботах М.Ф. Терещенко, Г.С. Тимчик, М.В. Чухраєва, А.Ю. Кравченко й інших [19; 20]. Конструкцію корпусу УЗ випромінювача зображено на рис. 16 і рис. 17.

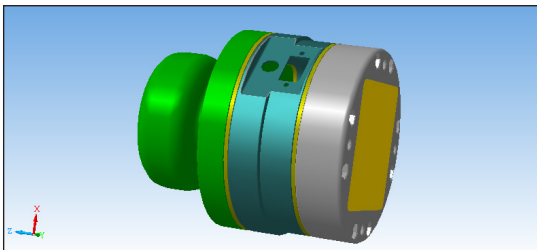


Рис. 16. Зовнішній вигляд 3D-моделі корпусу УЗ випромінювача

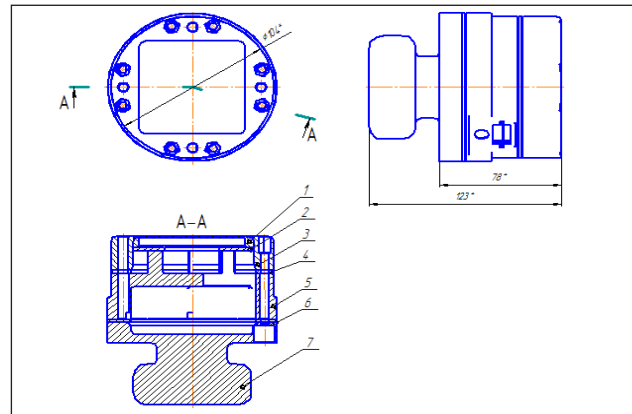


Рис. 17. Конструктивні розташування елементів УЗ випромінювача

На рис. 17 зображено конструкцію корпусу УЗ випромінювача, в якому позначено основні частини: 1. Основа (металева деталь, у якій закріплений п'єзоелемент і магніти); 2. Пластина (пластиковая деталь, що призначена для притиску основи поз. 1 до основи поз. 3); 3. Основа (пластиковая деталь, що виконує опорну функцію); 4. Прокладка; 5. Корпус; 6. Прокладка; 7. Кришка. На кресленні не показані деталі: термодатчики, магніти, п'єзоелемент, засоби кріплення та роз'єми.

**Висновки.** Отже, у статті подано огляд та аналіз апаратів ультразвукової терапії, що представлені сьогодні на ринку, які можуть бути використані для лікування такої хвороби, як деформуючий артроз гомілково-ступневого суглобу, в умовах фізіотерапевтичних відділень лікувально-профілактичних закладів. Технічні характеристики зведені в порівняльну таблицю. Запропоновано структурну схему модифікованого адаптивного апарату ультразвукової терапії, в якому вихідні параметри керуються залежно від стану параметрів тіла пацієнта, що забезпечує покращений контроль процедури ультразвукової терапії.

#### Список літератури:

1. Момбеков А.О., Дергунов А.В., Леонтьев О.В. Зміна когнітивної сфери у хворих на деформуючий артроз гомілково-ступневого суглобу в ранній і пізній періоди катамністичних спостережень / за ред. О.В. Леонтьєва, С.А. Парцерняка, В.С. Чорного. Санкт-Петербург: МІЕП при МПА ЄврАзЕС, 2013. 92 с.
2. Офіційний сайт Державного комітету статистики України. Київ, 2018. URL: <http://www.ukrstat.gov.ua> (дата звернення: 15.05.2018).
3. Назаров Е.А., Селезньов О.А. Регіонарні гемодинамічні зміни при деформуючому остеоартрозі гомілково-ступневого суглобу. Актуальні питання травматології. Досягнення. Перспективи: праці XVII Науково-практичної конф. (Москва, 11–13 листопада 2013 р.). Москва, 2013. С. 110–114.
4. Оцінка ризику розвитку важких форм артрозу гомілково-ступневого суглобу / Д.О. Ярмак, Д.А. Звичайний, Е.А. Мірошникова, Г.В. Коробушкін, Скороглядів. Сучасна травматологія, ортопедія і хірургія катастроф: праці I Всеросійської конференції з міжнародною участю (Москва, 3–6 жовтня 2015 р.). Москва, 2015. С. 160–167.
5. Струков А.И., Серов В.В. Патологическая анатомия. Москва, 1995. 687 с.
6. Ортопедия: Краткое руководство для практических врачей. Санкт-Петербург: Гиппократ, 2001. 368 с.
7. Орлова Л.П. Медицинская энциклопедия. Минск: Харвест, 2007. 896 с.

8. Елисеєв А.Г. Большая медицинская энциклопедия. Москва: Эксмо, 2009. 864 с.
9. Улащик В.С. Физиотерапия. Универсальная медицинская энциклопедия. Минск: Книжный Дом, 2008. 640 с.
10. Офіційний сайт підприємства «МедТеКо». URL: <http://www.medteco.ru/> (дата звернення: 15.05.2018).
11. Офіційний сайт підприємства «Метромед» НВП». URL: <http://www.metromedmm.ru/> (дата звернення: 15.05.2018).
12. Офіційний сайт підприємства «BTL Medical technologies». URL: <https://www.btlnet.com> (дата звернення: 15.05.2018).
13. Офіційний сайт підприємства «CHATANOVA GROUP». URL: <https://www.djoglobal.com> (дата звернення: 15.05.2018).
14. Офіційний сайт підприємства «gbo Medizintechnik AG». URL: <http://www.gbo-med.de/> (дата звернення: 15.05.2018).
15. Аппарат для физиотерапии комбинированный МИТ-11. URL: <http://www.medintex.com> (дата звернення: 15.05.2018).
16. Терещенко М.Ф., Румбешта В.О., Матюх Т.В. Розширення інформаційних можливостей сучасних ультразвукових діагностичних систем. Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Приладобудування». 2015. № 49. С. 108–112.
17. Терещенко М.Ф., Кирилова А.В. Принципи побудови сучасних ультразвукових терапевтичних апаратів. Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Приладобудування». 2010. Вип. 40. С.136–143.
18. Жук А.Ю. Адаптивные системы управления. «Молодежный научно-технический вестник» ФГБОУ ВПО «МГТУ им. Н.Э. Баумана». Москва, 2005. 111с.
19. Ультразвукові фізіотерапевтичні апарати та пристрої: монографія / М.Ф. Терещенко, Г.С. Тимчик, М.В. Чухраєв, А.Ю. Кравченко. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, «Політехніка», 2018. 184 с.
20. Вплив ультразвуку терапевтичних інтенсивностей на кластерну структуру дистильованої води / М.Ф. Терещенко, А.Ю. Кравченко, М.В. Чухраєв, А.Ю. Кудрянцева. Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Приладобудування». 2016. Вип. 51 (1). С. 126–131.

#### **ТЕРАПЕВТИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ ДЛЯ ЛЕЧЕНИЯ АРТРОЗА ГОЛЕНОСТОПНОГО СУСТАВА УЛЬТРАЗВУКОМ**

*В статье рассмотрены проблемы распространенности в Украине такой болезни, как деформирующий артроз голеностопного сустава (на основе данных государственной статистики), и терапевтические аппараты для лечения этой болезни с помощью ультразвука – аппараты ультразвуковой терапии, как отечественного, так и иностранного производства. Приведены данные о принципах построения, используемых в разработке новых аппаратных решений ультразвуковой терапии.*

**Ключевые слова:** ультразвук, ультразвуковая терапия, аппараты ультразвуковой терапии, артроз голеностопного сустава.

#### **THERAPEUTIC DEVICES FOR THE TREATMENT OF ARTHROSIS AN ANKLE JOINT BY ULTRASOUND**

*In this article, the problems of the prevalence of such an illness in Ukraine as deforming arthrosis of the tibia joint (on the basis of state statistics) and therapeutic devices for the treatment of this disease with ultrasound - ultrasound therapy devices, both domestic and foreign, are considered. Data on construction principles used in the development of new hardware solutions for ultrasound therapy are presented.*

**Key words:** ultrasound, ultrasound therapy, apparatus for ultrasound therapy, arthrosis of the ankle joint.

УДК 615.84:615.032

**Паньков С.Б.**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Терещенко М.Ф.**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**ЗАЛЕЖНІСТЬ ПАРАМЕТРІВ ПРОНИКНЕННЯ  
ФАРМАКОЛОГІЧНИХ ПРЕПАРАТІВ У БІОЛОГІЧНУ ТКАНИНУ  
ВІД ДІЇ УЛЬТРАЗВУКОВИХ КОЛИВАНЬ РІЗНОЇ ІНТЕНСИВНОСТІ**

*У статті досліджується ефективність впливу інтенсивності ультразвукових коливань на швидкість та глибину трансдермальної (черезшкірної) доставки фармацевтичних препаратів у біологічний об'єкт.*

**Ключові слова:** *ультразвук, трансдермальне введення препаратів, ультрафонофорез, проникність шкіри, підсилювачі шкірної проникності.*

**Постановка проблеми.** Із початком третього тисячоліття науковці та лікарі в галузі біомедичної інженерії все більшу увагу почали звертати на інвазійні технології трансдермального введення лікарських препаратів в організм людини.

Поштовою для цього стали застарілі довготривалі методики введення лікарських засобів, які застосовуються в медичних закладах нашої країни, які загрожують суттєвими недоліками та неефективною дією організму пацієнта. Найбільш популярними й застосовуваними сьогодні є такі: при парентеральному шляху введення – ін'єкційний спосіб (внутрішньовенний, внутрішньо-м'язовий, підшкірний), а при енттеральному – оральний спосіб (введення ліків в організм шляхом проковтування).

До суттєвих недоліків ін'єкційного способу належить можливе інфікування і повітряна емболія за умов неправильної техніки, пошкодження судинно-нервових пучків під час виконання ін'єкції, неможливість видалити введений препарат, якщо необхідне припинення лікування. Оральний спосіб введення має такі недоліки: лікарський засіб може викликати виразкові ураження шлунково-кишкового тракту, повільне надходження діючої лікарської речовини в системний кровотік, коливання значень швидкості всмоктування, яка залежить від наявності їжі в шлунково-кишковому тракті, на прийнятті всередину лікарські засоби впливають ферменти шлунка і кишкового соку, метаболічні ферментні системи печінки руйнують частину речовини ще до того, як воно проникне в системний кровотік [1].

Завдяки науковим дослідженням біофізичних особливостей поверхневих шарів шкіри під час

дії різних фізичних чинників та досконалості сучасних медичних апаратів появилася можливість доставляти активні субстанції через шкіряні покрови рогового шару, епідермісу, дерми, досягаючи значного проникнення в глибинні шари тканини з не меншою ефективністю, ніж у разі ін'єкцій за допомогою шприца [2].

Застосування неінвазійних методів трансдермального введення речовин збільшує ефективність дії деяких фармацевтичних препаратів (далі – ФП) і, як наслідок, дозволяє знизити дозування, що особливо важливо під час лікування пацієнтів з індивідуальними відмінностями або рідкими захворюваннями. Використання цих методів зумовлює відсутність подразнюючої дії на травну систему, тому знижується ризик появи ускладнень, пов'язаних із патологією шлунково-кишкового тракту. До того ж у цьому способі введення лікарської речовини вдається нівелювати детоксикаційну функцію печінки [3].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Процес визначення проникності фармацевтичних препаратів у біологічний об'єкт за умов фізичного підсилення різними полями та сигналами досліджували наукові школи США, Європейського Союзу, України, Росії, Білорусії та такі дослідники, як В.С. Улащик, Е.Г. Амброзович, А.А. Чиркин, І.А. Кравченко, Nishimura, Rowe, J. Kost, Mc Daniel, S. Mitragotri, Weimann, S. Tokumoto, С. Cochhar та інші [3; 4; 5; 8; 16].

Аналіз об'єктів інтелектуальної власності та літературних джерел показав, що ультразвукова технологія має великий потенціал для неінвазивного введення лікарських препаратів. За умов

впливу ультразвуку (далі – УЗ) підвищується проникність шкіри, посилюється екскреторна активність, збільшується кількість функціонуючих сальних і потових залоз, змінюється значення кислотності рН шкіри. Під час вивчення гістологічних змін шкіри було виявлено, що УЗ високої інтенсивності (1–2 Вт/см<sup>2</sup>) підсилює проникнення речовин, необоротно міняючи структуру шкіри, тоді як УЗ низької інтенсивності (0,1–1 Вт / см<sup>2</sup>) сприяє посиленню екскреції ліпідів [4]. Крім інтенсивності, мають значення такі параметри УЗ, як частота, форма коливань і час впливу.

Ультразвук, який можна характеризувати механічними коливаннями, частота яких становить більше 20 кГц, використовується для зниження бар'єрно-захисних властивостей шкіри та для полегшення трансдермального введення ФП. Методика ультрафонофорезу збільшує об'єм введення ФП за допомогою комбінації теплових, фізико-хімічних та механічних факторів у структурі шкіри. Доведено, що використання ультразвуку з низькою частотою (20 кГц) збільшує крізьшкірне проникнення речовин у декілька порядків (порівняно із застосуванням терапевтичного ультразвуку (1–3 МГц)). Різновидом цієї методики є приклад комбінації ультразвуку з низьким дозованим вакуумним впливом, що забезпечує більш ефективний результат [5].

**Постановка завдання.** Сьогодні використовуються велика кількість методик, для подолання бар'єрних властивостей шкіри та вдосконалення методів неінвазивного введення лікарських препаратів [6]. Перспективним напрямом трансдермального введення лікарських препаратів та подальшого його розвитку є визначення впливу параметрів акустичних сигналів на підвищення трансдермального дозування фармацевтичних препаратів. Технології неінвазивного введення лікарських препаратів у біологічний об'єкт дуже актуальні, зважаючи на відсутність подразнюючої дії на травну систему, зниження ризику появи ускладнень, скорочення термінів лікування.

Ефективність такого підходу була показана попередніми дослідниками, але системи доставки лікарського засобу, що використовують метод ультрафонофорезу та прямого впливу ультразвуку в зоні введення ФП, все ще знаходяться не на належному рівні розвитку, їх розробленню і дослідженню приділено недостатньо уваги, що потребує подальших теоретичних й експериментальних досліджень.

Тому завданням роботи є експериментальне дослідження ефективності дії ультразвукових

коливань різної інтенсивності, частоти та форми сигналу на глибину проникнення фармацевтичних препаратів протягом часу. Це дозволить контролювати та передбачати час введення лікарського засобу, його проникнення в глибокі шари тканини, створення високої концентрації препарату в заданій локальній зоні. При цьому підвищиться ефективність лікування, коли потрібно депонувати препарат для його пролонгованої дії, наприклад, під час болю в суглобах або хребті.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Ключовою проблемою трансдермальної доставки є труднощі під час проникнення ФП через шкіру. На підставі інформації про будову шкірного покриву можна зробити висновок, що трансдермальна доставка буде ефективною за умови, якщо ФП, подолавши епідерміс, надійде в достатній кількості в дерму, де розташовані капіляри кровеносних судин.

Трансдермальні терапевтичні системи (далі – ТТС) – це лікарські форми нового покоління, призначені для безперервного подання ліків у системний кровообіг крізь неушкоджений шкіряний покрив упродовж тривалого часу із заздалегідь заданою швидкістю [5].

Фармацевтичний препарат проникає в організм людини крізь кератиновий (роговий) шар шкіри шляхом абсорбції, частково крізь волосяні фолікули і сальні залози, розчиняючись у воді і жирах. Неушкоджений кератиновий шар виступає депо, з якого лікарські речовини проникають глибоко в шкіру. Таким чином, всі ТТС працюють за принципом пасивної дифузії. Біологічно-активні сполуки проникають крізь шкіру або слизові оболонки завдяки градієнту концентрації з обох боків напівпроникної мембрани, якою у такому разі виступає шкіра.

Доставка лікарських речовин через шкіру для лікування системних захворювань вимагає застосування хімічних речовин або будь-яких зовнішніх (фізичних) факторів, що підсилюють проникнення через шкірні шари ліків в незмінному вигляді за рахунок зниження бар'єрних властивостей шкіри або шляхом хімічної модифікації молекули [4; 9].

Хімічними підсилювачами проникності можна використовувати такі класи речовин на предмет посилення проникності: воду, вуглеводи, спирти, кислоти, ефіри, алкілові аміноєфіри, амідні, аміни, сульфоксиди, терпени, стероїди, діоксани. Крім хімічних речовин, для посилення проникності шкіри можуть використовуватися ліпосоми і етосоми. До фізичних факторів підсилення проникності ФП у

шкіру належить пряма чи опосередкована дія ультразвуку, електричного струму та поля – електрофорез та електропорація, дія магнітного поля, світлового променя, теплова дія та інше [7; 10].

Імовірність переміщення ліків у зоні дії ультразвукових хвиль впливає і з фізичних властивостей самого фактора. Одним із важливих компонентів в механізмі біологічної дії ультразвуку є утворення мікропотоків усередині клітин. Сутність явища полягає в тому, що в мікроскопічному об'ємі клітин з'являються акустичні потоки, що призводять до переміщення внутрішньоклітинних утворень і зміни просторової орієнтації. Ці зміни підвищують функціональну активність клітини і чутливість її до фізичних і хімічних факторів. Тому за умов спільного застосування ліків й ультразвуку можна очікувати посилення лікувального ефекту внаслідок інтегральної дії.

Одним з основних фізико-хімічних явищ, властивих ультразвуку під час ультрафонофорезу, є ультразвуковий капілярний ефект. Сутність його полягає в тому, що ультразвук здатний за певних умов різко збільшувати переміщення рідини в капілярах. Оскільки шкіра за своєю будовою належить до капілярно-пористим тіл, то цей ефект також можна вважати позитивним складником використання ультразвуку для лікарського ультрафонофорезу [15].

Збільшення проникності шкіри і клітинних мембран, посилення дифузійних процесів під впливом ультразвукових коливань поряд з активацією в організмі фізіологічних процесів стали підставою до використання ультразвуку для введення та підвищення проникності лікарських речовин через неушкоджену шкіру і слизові оболонки.

Механізм проникнення хімічних речовин через шкіру залишається маловивченим процесом, що пов'язано зі складною морфологічною будовою шкіри, різноманітними її функціями і фізико-хімічними особливостями проникаючої речовини. Проникнення речовин через шкіру є особливим випадком проникності мембран, оскільки шкіру можна вважати різновидом комплексу мембранної структури, що включає і мономолекулярні шари, і товсті шари різних клітин, і міжклітинні простори, наповнені складним матеріалом.

Проникнення речовин через шкіру здійснюється за рахунок механізмів клітинних мембран (проста дифузія, перенесення речовини з розчинником, дифузія обмежена мембранним зарядом, дифузія обмежена ліпідним бар'єром, обмінна дифузія, активний транспортний процес, піноцитоз, фагоцитоз) .

Речовина, розчинена у воді, проходить через спори кліткової мембрани зовні всередину клітини. При цьому вона не реагує з іншими молекулами, а її рух прямує до концентраційного градієнта. Швидкість простої дифузії залежить від температури, природи розчинених речовин і її ліпідної розчинності. Швидкість дифузії описується рівнянням (1), запропонованим фізіологом А. Фіком [8]:

$$\frac{d_m}{d_t} = -D \cdot s \cdot \lim_{l \rightarrow 0} \frac{C_1 - C_2}{L} \quad (1)$$

де  $D$  – коефіцієнт дифузії;  $s$  – площа мембрани;  $L$  – товщина мембрани;  $C_1$  і  $C_2$  – концентрація речовини по сторонах мембрани.

Р. Треггар, узагальнивши численні дані літератури, дійшов висновку, що проникнення (всмоктування) речовини через шкіру відбувається за законом Фіка і може бути виражено таким рівнянням (2) [8]:

$$J_s = \frac{K_m \cdot D_m}{\delta} \cdot \Delta C_s \quad (2)$$

де  $J_s$  – притік;  $K_m$  – коефіцієнт розподілу речовини між мембраною і розчинником;  $D_m$  – константа дифузії для розчиненої речовини в мембрані;  $\delta$  – товщина мембрани.

При цьому наголошується, що роговий шар є порівняно товстою мембраною. Товщина і коефіцієнт розподілу можуть бути визначені експериментально [9].

Нами досліджувалась математична модель взаємодії ультразвуку з біологічною тканиною [10]. Установлено залежність товщини  $l(\tau)$  мембрани від  $t$  – час дифузії в мембрані (еквівалентна часу випромінювання),  $\tau$  – стала часу для мембрани; дифузійний потенціал  $E$  – еквівалентного енергії випромінювання, сталої Фарадея  $F$ , універсальної газової сталої  $R$ , температури  $T$  ( $\tau$ ), потенціалів концентрації іонів  $u_k$ ,  $u_a$  [11]:

$$l(\tau) = -\frac{\tau}{t} \cdot \ln(1 - \exp(\frac{-E \cdot F}{R \cdot T(\tau)} \cdot \frac{u_k + u_a}{u_k - u_a})) \quad (3)$$

Так, контролюючи значення температури біологічної тканини  $T(\tau)$  можна прогнозувати товщину мембрани  $l(\tau)$ , а по її значенню визначати проникність речовин у клітину [12]. Таким чином, можливо відслідковувати значення часу випромінювання нормованих параметрів ультразвуку (за умов незмінної частоти та інтенсивності УЗ хвилі) потрібні для досягнення максимально допустимого ефекту, приймаючи за реакцію клітини зміну проникності мембрани [13]. Для порівняння з впливом ультразвуку на проникність ФП у шкіру досліджувалась і залежність глибини проникнення препаратів у біологічну тканину від частоти і часу впливу при імпульсному електрофорезі [14].

Перспективним напрямом діагностики та медико-біологічних досліджень проникності біологічної тканини є вимір залежності глибини проникнення фармакологічних препаратів у біотканини від параметрів (частота, інтенсивність, час дії) ультразвукових коливань [15]. В основу досліджень покладено завдання створення вимірювальної системи й алгоритму знаходження найбільш оптимальних параметрів ультразвукових коливань, для забезпечення необхідної глибини і швидкості проникнення фармакологічного препарату в біологічну тканину, забезпечення найбільш ефективності лікувального ефекту.

Метою експерименту було: 1) визначити залежність від параметрів впливу ультразвукових коливань на проникнення і розповсюдження різних фармакологічних препаратів у біологічне середовище (далі – БО); 2) дослідити вплив дії ультразвуку на зміну електричного опору біологічного об'єкту.

Поставлене завдання експерименту вирішена шляхом установлення закономірності глибини і швидкості проникнення лікувального препарату в біологічну тканину залежно від параметрів та форми ультразвукових коливань. У процесі виконання цього дослідження проведено низку експериментів на біологічній (сало свині) тканині з використанням різних фармакологічних препаратів різного кольору (наприклад, розчини йоду і діамантової зелені  $C_{27}H_{34}N_2O_4S$ , перманганату калію  $KMnO_4$  і ін.), з використанням експериментальної установки, схема якої наведена на рис. 1.

Генератором ультразвукових коливань для цього дослідження було обрано фізіотерапевтичний апарат («УЗТ-1.01-Ф»), який забезпечує генерування сигналу в синусоїдальному, імпульсному та неперервному режимі з регулюванням інтенсивності та часу дії на біологічний об'єкт (далі – БО). Після проведення експерименту здій-

снено заморожування дослідних зразків сала і виконання зрізів. За розмірами і глибиною проникнення плями фармакологічного препарату побудовані відповідні графіки залежності глибини проникнення препаратів у БО від інтенсивності УЗК і часу впливу.

Структурна схема експерименту зображено на рис. 1.



Рис. 1. Структурна схема експерименту

Досліджуваним зразком було обрано жирову тканину свині. Із метою максимального наближення стану цього біологічного зразка до стану живої біотканини протягом 30 хвилин зразки оброблялися в розчині  $NaCl$  0,9% (фізіологічний розчин). Після цього наноситься по 1 краплі препаратів на БО. Далі встановлюються відповідні параметри та форма ультразвукових коливань і час роботи апарату. На БО закріплюється ультразвуковий випромінювач. Після витримки заданого часу і проведення експерименту виконується заморожування дослідних зразків, проводяться відповідні зрізи після чого вимірюються розміри плями препарату і глибина проникнення.

Під час виконання цього експерименту було отримано такі результати (рис. 2).

Під час експерименту з визначенням електричного опору БО було проведено серію з п'яти дослідів по три виміри кожного.

Перша фаза експерименту: БО був у натуральному середовищі (без занурення в розчин  $NaCl$ ) та без впливу на нього ультразвукових коливань (УЗК).

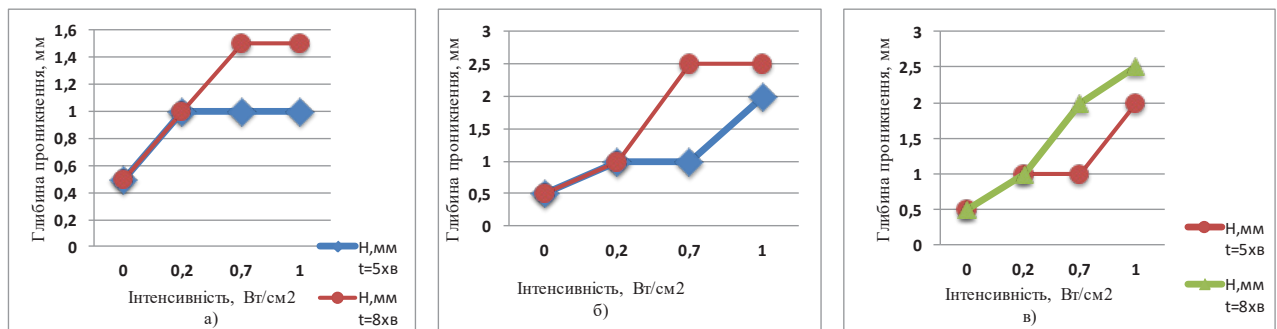


Рис. 2. Залежність глибини проникнення від інтенсивності УЗК: а) йоду; б) перманганат калію; в) брильянтової зелені



Результати експерименту

Експериментальна складова			№ виміру			Середні значення вимірювання, кОм
БО в натуральному вигляді	БО в розчині 0,9% NaCl		1	2	3	
		Інтенсивність УЗ, Вт/см <sup>2</sup>	Результат виміру, кОм			
ТАК	без впливу УЗ	-	92	89	93	91,33
НІ	без впливу УЗ	-	66	70	67	67,66
Ні	-	0,2	55	51	56	54
НІ	-	0,7	38	45	34	39
НІ	-	1	40	27	36	34,33

Друга фаза експерименту: БО перед вимірами був занурений на 15 хвилин у розчин NaCl 0,9%, на яких не дією УЗК.

Третя фаза експерименту: БО перед вимірами був занурений на 15 хвилин у розчин NaCl 0,9%, на який діяли УЗК з інтенсивністю 0,2 Вт/см<sup>2</sup>.

Четверта фаза експерименту: БО перед вимірами був занурений на 15 хвилин у розчин NaCl 0,9%, на який діяли УЗК з інтенсивністю 0,7 Вт/см<sup>2</sup>.

П'ята фаза експерименту: БО перед вимірами був занурений на 15 хвилин у розчин NaCl 0,9%, на який діяли УЗК з інтенсивністю 1 Вт/см<sup>2</sup>.

Результати експерименту наведено в таблиці 1.

Аналізуючи результати, будемо криву залежності імпедансу БО рисунок 3.

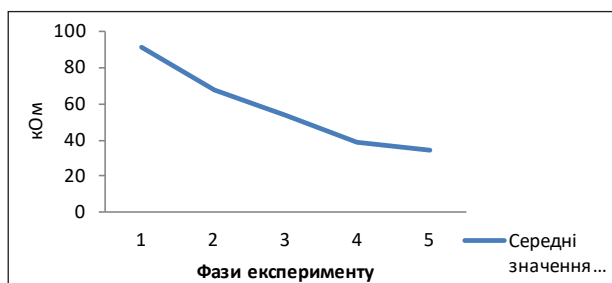


Рис. 3. Графік зміни імпедансу від параметрів УЗК та середовища БО

Порівнюючи отримані дані залежності глибини проникності від інтенсивності УЗК з даними авторів [14], які досліджували залежність глибини проникнення лікарських препаратів (йод та брильянтової зелені) від частоти електричного

струму, можемо спостерігати закономірність, зростання глибини проникнення зі зростанням часу дій фізичного підсилювача.

**Висновки.** Проаналізувавши результати експерименту щодо впливу зміни імпедансу біологічного об'єкта від дії на нього ультразвукових коливань, доходимо висновку, що розчин NaCl, у який занурювали БО задля утворення середовища ближчого до натурального, суттєво впливає на зміну показника рН, який впливає на зміну імпедансу та проникності в цілому. Вплив УЗК показав динаміку і закономірність: чим із більшою інтенсивністю впливаємо на БО, тим імпеданс зменшується.

Під час оцінювання впливу параметрів ультразвукових коливань на проникність фармацевтичних параметрів у біологічну тканину встановлено, що глибина проникності фармацевтичних препаратів залежить від параметрів ультразвуку: підвищення інтенсивності ультразвуку в терапевтичному діапазоні (до 1,0 Вт / см<sup>2</sup>) веде до збільшення глибини проникності; зменшення частоти ультразвуку супроводжується підвищенням його форетичної активності (здатність речовини проникати в шкірні шари) і введенням в організм великої кількості ФП; зі збільшенням тривалості процедури зростає надходження ФП в організм та глибина проникності проходить по експоненціальній залежності; під час використання безперервного синусоїдального режиму озвучування забезпечується введення в організм більшої кількості ФП та супроводжується більшою проникністю, ніж в імпульсному режимі.

#### Список літератури:

1. Конорев М.Р., Крапивко И.И., Рождественский Д.А. Курс лекций по фармакологии. Витебск: ВГМУ, 2013. Т.1. 244 с.
2. Беленькая И.М., Маргулис А.С. Правда и мифы о безыгольной мезотерапии: научный подход. Экспериментальная и клиническая дерматокосметология. 2012. № 3. С. 8–13.
3. Бучинський С.Н. Трансдермальні методи протизапальної терапії у практиці сімейного лікаря. Здоров'я України XXI сторіччя. 2017. № 17. С. 34.

4. Metod and apparatus for in vivo transdermal and/or intradermal delivery of drugs by sonoporation: Patent USA no. 6487447. 2002.
5. Кравченко И.А. Трансдермальное введение лекарственных препаратов. Одесса: Астропринт, 2001. 166 с.
6. Паньков С.Б. Изменение проницаемости биологических тканей при воздействии акустических сигналов. Новые направления развития приборостроения. Междунар. научно-техн. конф молодых учёных и студентов. (Минск, 18–20 апреля 2018 г.), Минск: БНТУ, 2018. С. 76.
7. Терещенко М.Ф., Кравченко А.Ю., Чухраєв М.В., Курлянцева А.Ю. Вплив ультразвуку терапевтичних інтенсивностей на кластерну структуру дистильованої води. Вісник НТУУ «КПІ». Сер. Приладобудування. 2016. № 51 (1). С. 126–131.
8. Улащик В.С. Трансдермальное введение лекарственных веществ и физические факторы: традиции и инновации. Минск: Белар. наука, 2017. 266 с.
9. Терещенко М.Ф., Кирилова А.В. Оцінка впливу ультразвукового сигналу на біологічні тканини. Вісник НТУУ «КПІ». 2010. № 39. С. 130–136.
10. Терещенко М.Ф., Тимчик Г.С., Чухраєв М.В., Кравченко А.Ю. Ультразвукові фізіотерапевтичні апарати та пристрої: монографія. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2018. 184 с.
11. Терещенко М.Ф., Кирилова А.В. Принципи побудови сучасних ультразвукових терапевтичних апаратів. Вісник НТУУ «КПІ». Сер. Приладобудування. 2010. Вип. 40. С. 137–145
12. Кирилова А.В., Терещенко М.Ф., Тимчик Г.С., Рудик В.Ю. Алгоритм автоматизованого оцінювання впливу ультразвуку на біологічну тканину. Наукові вісті НТУУ «КПІ». 2013. № 5. С. 98–102.
13. Терещенко М.Ф., Кирилова А.В.. Дослідження параметрів впливу ультразвукового сигналу на біологічні структури. Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Приладобудування». 2011. № 41. С. 136–143.
14. Терещенко М.Ф., Цапенко В.В., Чухраєв М.В. Дослідження залежності глибини проникнення препаратів у біологічну тканину від частоти і часу впливу при імпульсному електрофорезу. Міжнародний науковий журнал «Інтернаука». 2017. № 4. С. 60–67.,
15. Паньков С.Б., Терещенко Н.Ф.. Эффективность применения ультразвука при транскутанном методе введения лекарственных препаратов. Новые направления развития приборостроения. Междунар. научнотехнич. конф. молодых учёных и студентов. (Минск, 18–20 апреля 2018 г.), Минск: БНТУ, 2018. С.77.
16. Chukhraiev N.V., Vladimirov A.A., L.Vilcahuaman, W. Zukow, Samosyuk N.I., Chukhraieva E., Butskaya L.V. Application of ultrasonic waves, magnetic fields and optical flow in rehabilitation. Kiev, 2017. 3 24 p.

#### **ЗАВИСИМОСТЬ ПАРАМЕТРОВ ПРОНИКНОВЕНИЯ ФАРМАКОЛОГИЧЕСКИХ ПРЕПАРАТОВ В БИОЛОГИЧЕСКУЮ ТКАНЬ ОТ ДЕЙСТВИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ РАЗЛИЧНОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ**

*В статье исследуется эффективность влияния интенсивности ультразвуковых колебаний на скорость и глубину трансдермальной (черезкожной) доставки лекарственных препаратов в биологический объект.*

**Ключевые слова:** ультразвук, трансдермальное введение препаратов, ультрафонофорез, проницаемость кожи, усилители кожной проницаемости.

#### **DEPENDENCE OF PARAMETERS PENETRATION OF PHARMACOLOGICAL PREPARATIONS IN THE BIOLOGICAL TISSUE FROM ACTION OF ULTRASOUND OSCILLATIONS OF VARIOUS INTENSITY**

*The article investigates the effectiveness of the influence of the intensity of ultrasonic vibrations on the velocity and depth of transdermal (through the skin) delivery of pharmaceutical preparations into a biological object.*

**Key words:** ultrasound, transdermal drug delivery, ultraphonophoresis, skin permeability, skin permeability enhancers.

# РАДІОТЕХНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

УДК 621.396

*Євдокименко М.О.*

Харківський національний університет радіоелектроніки

*Шаповалова А.С.*

Харківський національний університет радіоелектроніки

## МЕТОД ОЦІНЮВАННЯ ВПЛИВУ АТАК НА ІНФОКОМУНІКАЦІЙНУ МЕРЕЖУ З УРАХУВАННЯМ НАЯВНИХ ВРАЗЛИВОСТЕЙ

*У статті досліджуються методи оцінювання критичності вразливостей та оцінювання розповсюдження атак в інфокомунікаційній мережі. Представлено проактивний підхід до кількісного оцінювання мережної безпеки, який дає змогу оцінити ризики на рівні користувача й мережі через наявність вразливостей. Запропоновані рішення будуть корисні для прийняття рішень і додатково інтегровані в єдину метрику для відображення сукупного рівня безпеки інфокомунікаційної мережі.*

**Ключові слова:** інфокомунікаційна мережа, вага, оцінювання вразливості, інформаційна безпека.

**Постановка проблеми.** Одним із важливих аспектів під час побудови сучасних інформаційно-комунікаційних мереж є забезпечення безпеки передачі інформації між кінцевими користувачами. Для цього натеper у процесі побудови сучасних інформаційно-комунікаційних мереж найчастіше використовують два етапи: створення інтегрованого захисту на базі таких елементів мережі, як комутатори й маршрутизатори, і використання спільного захисту, що включає побудову зв'язків між елементами мережного захисту. Однак така побудова захисту мережі в умовах постійного розвитку інфокомунікаційних технологій і, відповідно, кількості різномірних атак, що зростає, не є повноцінним захистом і вимагає перегляду. Як і раніше, «вузьким» місцем є швидке реагування на атаки, що виникають, із мінімізацією можливості їх поширення. Тому виникає необхідність у розробці математичної моделі оцінювання поширення атаки в мережі.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Оцінювання вразливості мережі є досить складним завданням з огляду на гетерогенність обладнання та програмного забезпечення. Сьогодні використовується спеціалізоване апаратне або програмне забезпечення (наприклад, GFI LanGuard, Nessus, XSpider тощо), яке сканує мережу на предмет виявлення слабких місць у системі безпеки й попереджає про зони ризику в інфокомунікаційній мережі. Ці програми дають змогу оцінити

мережну безпеку за допомогою активного та пасивного аналізу. Під активним аналізом (наприклад, тестування на проникнення) розуміється імітація атак зловмисника, яка перевіряє наявність вразливостей у мережі. Пасивний аналіз полягає в пошуках вразливостей за непрямими ознаками без підтвердження їх наявності, наприклад, наявність відкритих портів, перевірка заголовків протоколів тощо. При цьому для оцінювання безпеки мережі найчастіше необхідно використовувати ці два аналізи в сукупності. Насамперед варто використовувати пасивний аналіз як більш швидкий, але менш точний. Потім, після усунення виявлених вразливостей у результаті пасивного аналізу, доцільно використовувати активний аналіз, який за часом повільний, але більш точний.

Крім того, для оцінювання безпеки інфокомунікаційної мережі можуть використовуватися організаційні стандарти, оцінювання брандмауерів і їх політик безпеки для корпоративних мереж (Virtual Private Network, VPN), метод оцінювання ризиків, що базується на побудові графа атак. Також використовуються кількісні оцінки безпеки, що базуються на чутливості системи до атак, метрики безпеки, засновані на аналізі найслабшого супротивника (тобто мінімальному зусиллі, що необхідне для успішної атаки) з прогнозуванням і вимірюванням вразливостей мережі. Однак усі перераховані вище методи переважно намагаються виявити наявні ризики й

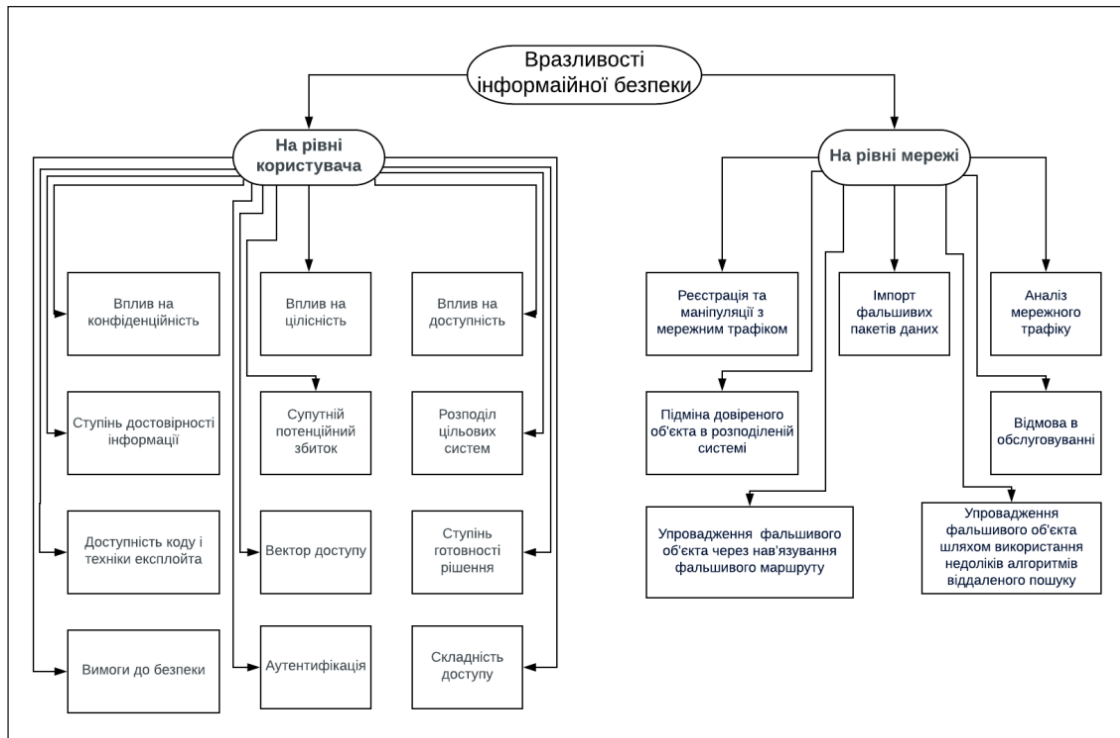


Рис. 1. Класифікація вразливостей інформаційної безпеки на рівні користувача та на рівні мережі

не вирішують проблеми кількісної оцінки безпеки системи в момент, коли вразливість використана й атака поширюється в мережі від вузла до вузла.

Для оцінювання поширення тієї чи іншої атаки в інфокомунікаційній мережі необхідно розуміти причину виникнення атаки як результат використання наявної вразливості в мережі, а також можливу шкоду, заподіяну цією атакою. Під час аналізу наявних рішень [1, с. 86; 2, с. 28; 3, с. 29] щодо оцінювання вразливостей і подальшого збитку виявлено, що основним їх недоліком є їх вузька спрямованість на певні елементи мережі, на окремі додатки, сервіси та ресурси, у результаті чого неможливо оцінити ризики та модель поширення атаки в мережі загалом. Виходячи із цього, в роботі пропонується оцінювати вразливості як на рівні мережі, так і на рівні користувача, класифікація яких представлена на рис. 1.

**Постановка завдання. Мета статті** – оцінити ступінь критичності завданих збитків в умовах успішної реалізації зловмисником атаки й у момент розповсюдження атаки в мережі, використовуючи вагові коефіцієнти; визначити найбільш вразливі місця мережі, використовуючи пасивний аналіз безпеки мережі для мінімізації можливих втрат.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Безпека інфокомунікаційної мережі залежить від таких факторів, як захищеність кінцевого користувача (планшета, смартфона тощо) і мережних елементів (маршрутизаторів, комутаторів тощо).

І якщо захист на рівні мережі можливо забезпечити починаючи з етапу проектування за допомогою наявних контрзаходів (брандмауер, IDS/IPS тощо), то на рівні користувача забезпечення безпечної передачі даних є досить важким завданням і практично неможливим. Коли на користувальницькій стороні є вразливості (відсутність антивірусних програм, незахищене підключення до локальних мереж і мережі Internet, помилки під час авторизації тощо), то їх використання зловмисником є ризиком для інфокомунікаційної мережі.

У разі виявлення вразливості на стороні користувача потрібен час, перш ніж будуть вжиті відповідні контрзаходи (відмова в доступі, оновлення додатку тощо). Отже, протягом цього часу мережа вразлива для зовнішньої атаки. Для визначення ризику використання наявної вразливості використовуємо експоненціальний розподіл для кількісної оцінки найгіршого сценарію, коли зловмисник використав вразливість і завдав шкоди мережі. Згідно з твердженнями деяких авторів [12, с. 199], існують такі показники потенційного збитку (таблиця 1).

Нехай  $S_j$  ( $j = \overline{1, J}$ ) – безліч послуг (наприклад, онлайн відео), що надаються користувачеві мережею, а  $V(y_j)$  – безліч вразливостей, які

Показники потенційного збитку під час експлуатації вразливостей

Показник	Опис показника
Відсутнє	У результаті успішної експлуатації вразливості втраг немає
Низький	У результаті успішної експлуатації вразливості відбувається незначне зниження продуктивності, збиток мінімальний
Низький – середній	У результаті успішної експлуатації вразливості відбувається зниження пропускної здатності мережі, запити користувачів обробляються довше, ніж визначено в SLA
Середній – високий	У результаті успішної експлуатації вразливості відбувається істотне зниження продуктивності, фінансовий збиток серйозний
Високий	У результаті успішної експлуатації вразливості цими користувача й мережі завдається катастрофічна шкода

виявлені в послугах, тобто  $y_j \in S$   $C(y_j)$  – показник критичності вразливості  $y_j$ , під яким розуміються завдані збитки мережі. Тоді для розрахунку ризику  $R(S)$  використовується вираз, запропонований у праці [7, с. 84],

$$R(S) = w_{y_j} \cdot \ln \sum_{y_j \in V(S)} e^{C(y_j)},$$

де  $w_{y_i}$  – вагові коефіцієнти, які використовуються для оцінювання ризику, створювані вразливістю  $y_i$ .

На жаль, із практичного погляду для забезпечення безпеки мережі часто аналізують вразливості на рівні користувача вже після того, як мережа зазнала впливу. Також існують ситуації, коли всі найбільш критичні вразливості усунені, але через деякий час мережа знову зазнає впливу з боку користувача. Це відбувається через недостатній з погляду безпеки аналіз пропонованої послуги/сервісу/дodatку (особливо це стосується додатків з відкритим кодом і технікою експлойту). Ця ситуація викликає необхідність прогнозування ризиків у разі виникнення нових вразливостей на рівні користувача. Тоді нехай  $P_i(y_j^n)$  – імовірність виявлення нової вразливості  $y_j^n$ , а  $y_j^n \in S$ , що надаються в послугах/сервісах/ додатках, яке дасть уявлення про ризики, з якими зіткнеться мережа в майбутньому,  $C_n(y_j^n)$  – очікуваний показник критичності вразливості, а  $P_c(y_j^n)$  – імовірність використання нової вразливості зловмисником. Тоді для розрахунку очікуваного ризику  $R_n(S)$  використовуємо такий вираз:

$$R_n(S) = P_i(y_j^n) \cdot \sum_{y_j^n \in S} C_n(y_j^n) \cdot P_c(y_j^n). \quad (2)$$

Аналіз наявних досліджень показав [8, с. 215; 9, с. 217; 10, с. 278; 11, с. 108], що саме мережеві політики визначають схильність мережі впливу зовнішніх факторів, а також інтенсивність атаки на мережу (тобто наскільки широко може бути поширена атака). Кількісна оцінка ризику (інтен-

сивність атаки) на мережевому рівні включає в себе оцінку поширення можливої атаки ( $RA$ ).

Тоді ступінь, до якої політика допускає поширення атаки всередині мережі, буде визначається метрикою поширення атаки ( $RA$ ). Поширення атаки оцінюється складністю поширювати атаку по мережі, використовуючи вразливості послуг, що надаються, а також вразливості політики безпеки.

Для подальшого проведення аналізу введемо ймовірність наявності вразливості наданої послуги на  $i$ -му вузлі  $P_{y_j,i} \in (0,1)$  та оцінку  $L_{y_j,i}$ , яка визначає вразливість послуги  $S_{y_j,i}$  до атаки на  $i$ -му вузлі. Тоді  $L_{y_j,i}$  обчислюється з  $P_{y_j,i}$ , комбінованого показника вразливості послуги  $S_{y_j,i}$ , так:

$$L_{y_j,i} = -\ln(P_{y_j,i}), \quad (3)$$

при цьому  $L_{y_j,i}$  має діапазон  $[0, \infty)$  та використовується для вимірювання легкості, з якою зловмисник може поширювати атаку з одного вузла на інший, використовуючи послугу  $S_{y_j,i}$  на  $i$ -му вузлі. Отже, якщо вузол  $i$  може підключитися до вузла  $j$  під час передачі трафіку з наданням послуги  $S_{y_j,i}$ , тоді  $L_{y_j,i}$  вимірюється як стійкість вузла  $k$  до атаки, ініційованої  $i$ -м вузлом.

Для розрахунку метрики поширення атаки з  $i$ -го вузла з порушенням роботи інших вузлів, що знаходяться в межах досяжності від  $i$ -го вузла, побудуємо мінімальне остовне дерево для сегмента мережі, тобто всіх тих вузлів, які зазнають атаку через  $i$ -й вузол. Вага цього мінімального остовного дерева буде визначати, наскільки цей сегмент мережі вразливий до атаки. Чим більш вразлива мережа, тим вищою буде ця вага. Для визначення ваги використовуємо такий вираз:

$$W_i = \sum_{i \in M} (\prod P_{y_j,i}) \cdot cost_i, \quad (4)$$

де  $cost_i$  відображає вартість збитку при компроматації вузла  $i$ , а  $M$  – це безліч вузлів, наявних в остовному дереві. Тоді метрика поширення атаки визначається таким виразом:

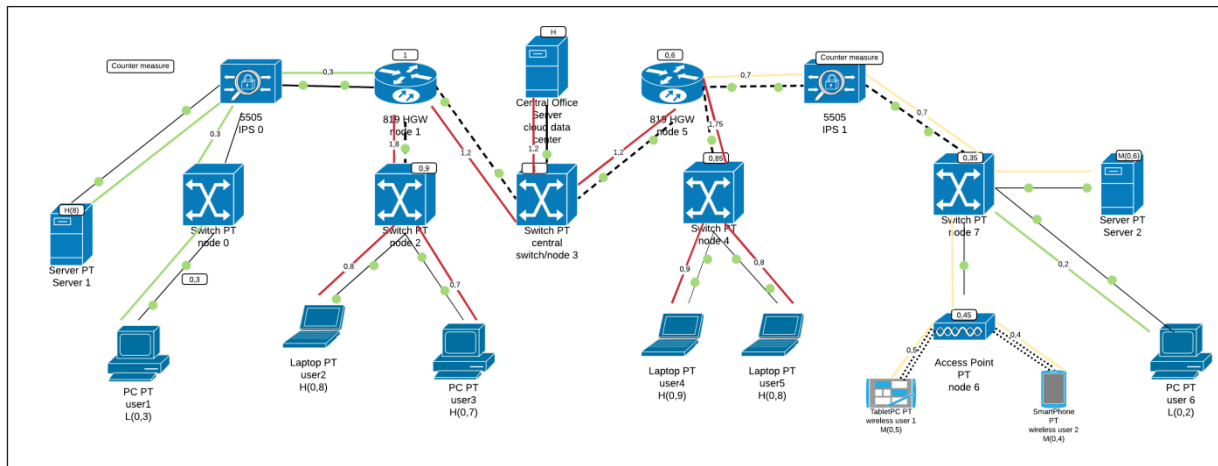


Рис. 2. Експериментальна схема мережі

$$RA = \sum_{i \in M} P_{y_j, i} \cdot W_i, \quad (5)$$

де  $P_{y_j, i}$  – ймовірність існування вразливості на  $i$ -му вузлі.

Розрахунок оцінки ризиків з боку зовнішніх впливів (External Factor) базується на частці адресного простору, на якому функціонує послуга, тому що саме адресний простір є найбільш «вужким» місцем під час забезпечення безпеки мережі від зовнішніх впливів. Зовнішні впливи на послугу  $S_j$  ураховують кількість портів  $Ports(s_j)$  та IP-адресів  $IP(s_j)$ , при цьому загальна кількість IP-адрес – 232, а загальна кількість портів – 216. Отже, діапазон цього коефіцієнта буде починатися з мінімального значення 1 для повністю прихованого від мережі сервісу й досягне максимального значення 2 для сервісу, повністю схильного до впливу всього адресного простору. Тоді метрика впливу зовнішніх факторів на мережу визначається так:

$$EF(s_j) = 1 + \frac{\log_2(IP(s_j) \cdot Ports(s_j))}{\log_2(2^{32} \cdot 2^{16})}, \quad (6)$$

припускаючи, що ризик від зовнішньої мережі розподіляється рівномірно. Високе значення цієї метрики вказує на те, що мережа повинна бути розділена, щоб мінімізувати зв'язок у мережі й розповсюдження атак. Отже, ці метрики дають змогу оцінити поширення атаки в мережі.

Згідно із цим підходом, проведено експериментальне дослідження на базі імітованої мережі, що складається з декількох типів кінцевих пристроїв та інтегрованих послуг зв'язку. Атака імітується на рівні додатка через службовий порт 80, який використовує TCP (рис. 2). Для кожного пристрою обрано вразливості з різними вагами, що характеризують критичність самої вразливості.

Якщо розглядати стан, у якому мережа знаходиться під впливом атаки, що розповсюджується від однієї кінцевої точки або декількох кінцевих пристроїв, відповідно до (5)–(6), знаючи ваги наявних вразливостей, можливо оцінити очікуваний ризик по маршрутах передачі даних, що залежить від ваги вразливості на вузлі.

У результаті експерименту на рис. 2 отримані шляхи розповсюдження атаки в мережі від користувача до датацентру в цьому випадку. Вплив і втрати прямо залежать від ваги вразливості (критичності) на рівні кінцевого користувача. Так, від різних користувачів з різними за вагою вразливостями у випадку здійснення втручання зловмисника атака буде розповсюджуватися найкоротшим шляхом до датацентру. У результаті цього мережа розподілена на сегменти за критичністю майбутніх утрат у разі розповсюдження атаки, які показано на рис. 2 різними кольорами. Так, зеленим кольором показано шляхи розповсюдження атаки, які завдасть мінімальні втрати; жовтим і червоним – більш критичні атаки, які реалізовані за допомогою наявних вразливостей, що мають критичну для мережі вагу.

Припустимо, що ризик із зовнішньої мережі розподіляється рівномірно. Високе значення цієї оцінки вказує на те, що для мінімізації мережного з'єднання та поширення атаки мережа повинна бути розділена. Однак на мережному рівні можуть бути прийняті такі запобіжні заходи:

- 1) реалізація віртуальних локальних мереж;
- 2) перегрупування мережі, щоб пристрої з еквівалентним ризиком перебували в тій самій ділянці;
- 3) збільшення кількості контрольних точок (брандмауери, IDS);

4) підвищення безпеки навколо «активних» точок у мережі.

Крім того, дійсні IP-адреси й порти повинні бути ретельно перевірені, щоб гарантувати, що IP-адреса або порти не будуть ненавмисно дозволені.

**Висновки.** Захищеність інфокомунікаційної мережі залежить від методів вимірювання безпеки й інструментів, які дають змогу мережним адміністраторам аналізувати та оцінювати безпеку. У роботі пропонується проактивний підхід до кількісної оцінки безпеки мереж, який допомагає оцінити ризики на рівні користувача й на рівні мережі за допомогою наявності вразливостей. З урахуванням того, що кожна мережа містить різні за характером вразливості й для кожної мережі ці вразливості мають різний рівень критичності, використовувати

єдиний підхід для оцінювання рівня захищеності не видається можливим. Однак, знаючи критичність тієї або іншої вразливості, за допомогою цього підходу (1)–(6) можна оцінити можливі ризики та мінімізувати їх за допомогою введення додаткових контрзаходів, що, у свою чергу, призведе до мінімізації збитку, який може бути заподіяний як користувачу, так і мережі. Так, наприклад, якщо в результаті розрахунків ризиків отримані оцінки нижчі за припустимі в рамках використовуваних політик безпеки конкретної мережі, то необхідно переглянути механізмів безпеки. Виходячи із цього, запропоновані рішення будуть корисні для прийняття рішень і надалі будуть інтегровані в єдину метрику для відображення комплексного рівня безпеки інфокомунікаційної мережі.

#### Список літератури:

1. Mohammad, Salim A., Al-Shaer, E., Taibah, M., Latifur K. Prediction capabilities of vulnerability discovery models. Reliability and maintain ability symposium. 2006. P. 86–91.
2. Abedin, M., Nessa, S., Al-Shaer, E., and Khan, L. Vulnerability analysis for evaluating quality of protection of security policies. 2nd ACM CCS workshop on quality of protection, Alexandria. 2006. P. 28–39.
3. Bock, F. An algorithm to construct a minimum directed spanning tree in a directed network. Developments in Operations Research. Gordon and Breach. 1991. P. 29–44.
4. NIST Cloud Computing Program. National Institute of Standards and Technology. URL: <http://csrc.nist.gov/publications/nistpubs/800-145/SP800-145.pdf>.
5. Hewitt Carl ORGs for Scalable, Robust, Privacy-Friendly Client Cloud Computing. IEEE Internet Computing. 2008. Vol. 12, Issue: 5. P. 96–99.
6. AlertLogic. Cloud Security Report: Research on the Evolving State of Cloud Security. 2014. URL: <https://www.alertlogic.com/resources/cloud-security-report.pdf>.
7. Al-Shaer, E., and Hamed, H. Discovery of policy anomalies in distributed firewalls. IEEE INFOCOM'04. 2004. P. 84–97.
8. Kamara, S., Fahmy, S., Schultz, E., Kerschbaum, F., Frantzen, M. Analysis of vulnerabilities in internet firewalls. Network Security. 2003. 22 (3). P. 214–232.
9. Ammann, P., Wijesekera, D., and Kaushik, S. Scalable. Graph-based network vulnerability analysis. 9th ACM conference on computer and communication security. New York, USA. 2002. P. 217–224.
10. Feng, C., Jin-Shu, S. A flexible approach to measuring network security using attack graphs. International symposium on electronic commerce and security. 2008. P. 278–304.
11. Chunlan Li, Zhonghua Deng. Value of Cloud Computing by the View of Information Resources. Network Computing and Information Security (NCIS). International Conference on. 2011. Vol. 1. P. 108–112.
12. Yevdokymenko M., Mayangani Manasse, Dmitriy Zalushniy, Batoul Sleiman. Analysis of Methods for Assessing the Reliability and Security of Infocommunication Network. 4th International Scientific-Practical Conference «Problems of Infocommunications. Science and Technology» PIC S&T'2017. X., ХНУРЕ. 2017. P. 199–202.

#### МЕТОД ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ АТАК НА ИНФОКОММУНИКАЦИОННУЮ СЕТЬ С УЧЕТОМ СУЩЕСТВУЮЩИХ УЯЗВИМОСТЕЙ

*В статье исследуются методы оценки критичности уязвимостей и оценки распространения той или иной атаки в инфокоммуникационной сети.*

*Представлен проактивный подход к количественной оценке сетевой безопасности, который позволяет оценить риски на уровне пользователя и сети из-за присутствия уязвимостей. Предложенные решения будут полезны для принятия решений и дополнительно интегрированы в единую метрику для отображения интегрированного уровня безопасности инфокоммуникационной сети.*

**Ключевые слова:** защищенность, вес, сеть, инфокоммуникации, безопасность, оценка уязвимости, инфокоммуникационная безопасность.

**ASSESSMENT METHOD OF THE ATTACKS INFLUENCE  
ON THE INFOCOMMUNICATION NETWORK ACCORDING TO EXISTING VARIABILITY**

*The article explores methods for assessing vulnerabilities and the spread of an attack in an infocommunication network. A proactive approach to the quantitative assessment of network security, which allows us to assess risks at the user and network level through the of existing vulnerabilities is presented. The proposed solutions will be useful for decision making and will be further integrated into a single metric for displaying the integrated level of security of the infocommunication network.*

**Key words:** security, weight, network, infocommunications, security, vulnerability assessment, information security.



УДК 004.7:654.195.6

**Лазебний В.С.**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Інь Ченлян**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПЕРЕДАВАННЯ АУДІОВІЗУАЛЬНОЇ ІНФОРМАЦІЇ ЗАСОБАМИ БЕЗПРОВОДОВОЇ МЕРЕЖІ 802.11n**

У статті наведено результати досліджень експлуатаційних характеристик безпроводової мережі IEEE 802.11n, що функціонує у змішаному режимі з використанням одного просторового каналу в частотній смузі 20 МГц. Проаналізовано вимоги щодо параметрів передавання аудіовізуальної інформації в IP мережі. У статті наведено результати розрахунків пропускної здатності мережі, ймовірності виникнення колізій та ймовірності успішного передавання кадру даних в насиченій мережі, отримано значення середнього часу та нерівномірності затримки передавання пакетів. Розрахункові співвідношення розроблено на підґрунті концепції віртуального конкурентного вікна. За результатами розрахунків отримано оцінки щодо ефективності застосування мережі IEEE 802.11n для передавання аудіовізуальної інформації.

**Ключові слова:** аудіовізуальна інформація, безпроводова мережа, віртуальне конкурентне вікно, колізія, конкурентний доступ, корисне навантаження, режим RST/CST.

**Окреслення проблеми.** Безпроводові локальні мережі широко використовують як приватні користувачі, так і корпоративні користувачі. Поширюються мережі 802.11 (Wi-Fi) загального користування для доступу до інформаційних ресурсів в місцях скупчення та активної діяльності великих груп людей (вокзали, аеропорти, супермаркети, центральні зони міст тощо). Абонентськими станціями, приєднаними до мереж, є сучасні мобільні телефони, планшети, портативні комп'ютери, які обладнані однією антеною Wi-Fi.

Значну частину інформації, яку прагнуть отримати користувачі, складає аудіовізуальна інформація. Безпроводові мережі стандарту 802.11 є зручним і доступним (дешевим) засобом для отримання і передавання відео (відеоконференції, перегляд кінофільмів, телевізійних програм, спортивних подій, відеоконтенту із соціальних мереж) та звукової (IP-телефонія, доступ до пісень та концертних фонограм тощо) інформації, яка є потоковою інформацією. Такі інформаційні потоки створюють велике навантаження на телекомунікаційну мережу, що призводить до погіршення якісних показників мережі та унеможливає забезпечення якісних інформаційних послуг.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питанням прогнозування експлуатаційних харак-

теристик мереж присвячено багато наукових досліджень [1–3], проте через складність завдання дослідники здебільшого спираються на попередній досвід розгортання та експлуатації безпроводових мереж стандарту 802.11. Теоретичні розрахунки пропускної здатності безпроводової мережі ґрунтуються на аналізі мережі з насиченим навантаженням, запропонованому Джузеппе Б'янкі [4]. Зазначений підхід поширили для аналізу мереж 802.11 всіх специфікацій, однак отримані результати мають суттєві відмінності від вимірюваних на практиці параметрів. З вищенаведеного випливає, що теоретичне дослідження процесів, які мають місце під час функціонування безпроводових мереж стандарту 802.11, і розроблення розрахункових співвідношень, що дозволяють оцінити можливість безпроводової мережі щодо передавання аудіовізуальних інформаційних потоків, є актуальним завданням.

**Метою дослідження** є оцінювання ефективності передавання аудіовізуальної інформації засобами безпроводової мережі 802.11n. Для досягнення поставленої мети в роботі проаналізовано вимоги до характеристик безпроводової мережі для забезпечення гарантованої якості обслуговування, досліджено характеристики мережі з урахуванням алгоритму її функціонування. За результатами порівняння необхідних

Розрахункові значення швидкості передавання даних в одному просторовому каналі мережі IEEE 802.11n

Індекс MCS	Кількість просторових потоків	Тип модуляції та швидкість коду	Швидкість передавання даних (GI=0,8 мкс), Мб/с, $\Delta f = 20$ МГц	Швидкість передавання даних (GI=0,4 мкс), Мб/с, $\Delta f = 20$ МГц	Швидкість передавання даних (GI=0,8 мкс), Мб/с, $\Delta f = 40$ МГц	Швидкість передавання даних (GI=0,4 мкс), Мб/с, $\Delta f = 40$ МГц
0	1	BPSK 1/2	6,5	7,2	13,5	15
1	1	QPSK 1/2	13	14,4	27	30
2	1	QPSK 3/4	19,5	21,7	40,5	45
3	1	16-QAM 1/2	26	28,9	54	60
4	1	16-QAM 3/4	39	43,3	81	90
5	1	64-QAM 2/3	52	57,8	108	120
6	1	64-QAM 3/4	58,5	65	121,5	135
7	1	64-QAM 5/6	65	72,2	135	150

показників якості та прогнозних характеристик зроблено оцінювання ефективності мережі.

Згідно із загальноприйнятим значенням поняття ефективності [5] будемо розглядати ефективність як показник успішності функціонування системи для досягнення установлених цілей. Тобто оцінимо, як співвідносяться граничні показники швидкості передавання даних та системні показники безпроводової мережі з реальною пропускною здатністю мережі й експлуатаційними показниками у разі передавання аудіовізуальної інформації.

Зауважимо, що технологія за специфікацією 802.11n є удосконаленою технологією 802.11a, в якій додатково передбачено можливість розширення частотної смуги радіоканалу з 20 МГц до 40 МГц, агрегування пакетів одного інформаційного потоку та можливість одночасного передавання кількох інформаційних потоків за технологією MIMO (з кількох виходів передавача інформаційні потоки передають одночасно на кілька входів приймача). А технологія 802.11ac є удосконаленою технологією 802.11n, в якій подальше збільшення пропускної здатності мережі досягнуто головним чином розширенням діапазону використовуваних параметрів. На підставі зазначеного дослідження стосовно особливостей передавання аудіовізуальної інформації доцільно зробити для мереж 802.11n.

**Коротка характеристика мережі за специфікацією 802.11n.** Мережа 802.11n може функціонувати в діапазоні 2,4 ГГц і використовувати радіоканал з шириною частотної смуги 20 МГц (так само, як це передбачено специфікаціями 802.11g/b) або 40 МГц (два об'єднаних суміжних

канали по 20 МГц) чи в діапазоні 5 ГГц (як це передбачено специфікацією 802.11a) з використанням частотних каналів 20 та 40 МГц.

Специфікацією передбачено застосовувати для передавання інформації систему модуляції та кодування OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing). Основні параметри системи OFDM, передбачені в специфікації 802.11n, такі: тривалість корисної частини символу OFDM 3,2 мкс, тривалість захисного інтервалу 0,8 або 0,4 мкс; кількість носійних частот для каналу з частотною смугою 20 МГц становить 52, кількість частот для передавання пілот-сигналів 4; кількість носійних частот для каналу з частотною смугою 40 МГц становить 112, кількість частот для передавання пілот-сигналів 6. Максимальна величина агрегованих кадрів становить: A-MPDU – 4095 (завичай обмежують 2346) байтів, A-MSDU – 4065 (завичай обмежують 2304) байтів. Для модуляції і кодування носійних OFDM символу передбачено велику кількість схем (всього 77 схем з урахуванням можливих режимів MIMO – Multiple Input Multiple Output). Кожну схему позначають відповідним індексом MCS (Modulation and Coding Scheme). Значення швидкості передавання даних в межах кадру фізичного рівня наведено в табл. 1.

У специфікації 802.11n регламентовано три режими роботи мережі:

1. High Throughput (HT) або Greenfield Mode – режим з великою пропускною здатністю, в якому можуть функціонувати тільки мережні станції (клієнти), що підтримують стандарт 802.11n.

2. Non-HT (Legacy) Mode – успадкований режим, всі кадри, відправлені станціями мережі в якому, сформовані відповідно до специфікації

Характеристики потоків даних, сформованих звуковими кодеками

Характеристики звукового кодека				Розрахунок інтенсивності інформаційного потоку			
Кодек & Бітова швидкість (кб/с)	Розмір вибірки кодека (байтів)	Інтервал вибірки кодека (мс)	Усереднена суб'єктивна оцінка (MOS*)	Розмір голосових даних (байтів)	Тривалість голосових даних (мс)	Кількість пакетів за секунду (PPS)	Пропускна здатність Ethernet (кб/с)
G 711 (64 кб/с)	80	10	4.1	160	20	50	87.2
G 729 (8 кб/с)	10	10	3.92	20	20	50	31.2
G 723.1 (6.3 кб/с)	24	30	3.9	24	30	33.3	21.9
G 723.1 (5.3 кб/с)	20	30	3.8	20	30	33.3	20.8
G.726 (32 кб/с)	20	5	3.85	80	20	50	55.2
G.726 (24 кб/с)	15	5		60	20	50	47.2
G 728 (16 кб/с)	10	5	3.61	60	30	33.3	31.5
G722_64k (64 кб/с)	80	10	4.13	160	20	50	87.2
ilbc_mode_20 (15.2 кб/с)	38	20	NA	38	20	50	38.4
ilbc_mode_30 (13.33 кб/с)	50	30	NA	50	30	33.3	28.8

\*Примітка: Mean Opinion Score (MOS) – усереднена суб'єктивна оцінка

стандартів 802.11a/g (допустима ширина частотної смуги каналу тільки 20 МГц).

3. HT Mixed Mode – змішаний режим, за якого є можливість використати переваги режиму з високою пропускною здатністю спільно з механізмом, який реалізує можливість роботи з обладнанням, відповідним стандартам 802.11a/g. Преамбула старого формату надає можливість клієнтам, що функціонують за протоколами 802.11a/g передавати і приймати дані від точки доступу IEEE 802.11n.

Основною технологією доступу до радіоканалу є технологія конкурентного доступу із застосуванням кадрів RTS та CTS (Request To Send/Clear To Send). Передавання кадрів RTS відбувається в режимі конкурентного доступу за алгоритмом DCF. Режим передавання буде залежати від кількості антен передавальної та приймальної станції. Тобто режим із застосуванням кількох просторових каналів передавання (MIMO) може бути реалізовано у форматі: 2x2, 3x3, 4x4, 2x3, 3x2, 2x1, 1x2. Останні два формати: 2x1 – дві передавальні антени і одна приймальна (SIMO – single input, multiple output) та 1x2 – одна передавальна антена і дві приймальних (MISO – multiple input, single output) забезпечують таку ж максимальну пропускну здатність, що й система 1x1 (SISO – single input, single output), але із більшою надійністю. Тобто можуть забезпечити максимальну пропускну здатність за умови наявності більшого рівня радіозавад в каналі порівняно з системою SISO.

**Характеристики аудіовізуальних інформаційних потоків.** Щоб оцінити ефективність застосування мережі 802.11n для передавання аудіовізуальної інформації, треба з'ясувати, які характеристики процесу передавання є найбільш критичними для якісного забезпечення відповідних інформаційних послуг. Згідно з рекомендацією ITU-T Y1541 найбільш впливовими характеристиками є середня затримка, нерівномірність (джитер) часу передавання та ймовірність втрати пакету.

Проаналізуємо, які розміри мають пакети даних, що передають звукову та відео інформацію. Характеристики потоків даних, сформованих найбільш поширеними звуковими кодеками, наведено у табл. 2 [6].

Розглянемо окремо характеристики інформаційного потоку одного з найбільш популярних кодеків G 711. Цей кодек генерує 50 пакетів за секунду (періодичність генерування пакетів 20 мс), кожен пакет містить 160 байтів корисного навантаження, загальна величина одного пакета з урахуванням заголовків протоколів різних рівнів IP мережі становить 218 байтів, що обумовлює інтенсивність інформаційного потоку 87,2 кб/с.

Розглянемо тепер характеристики відеопотоку. Найбільшого поширення для передавання відео в IP мережах набула технологія, за якої кілька пакетів транспортного потоку MPEG2 TS вставляють (інкапсулюють) в IP пакет. На рис. 1 наведено структуру такого пакета.



Рис. 1. Структура IP пакета відеопотоку в мережі Ethernet

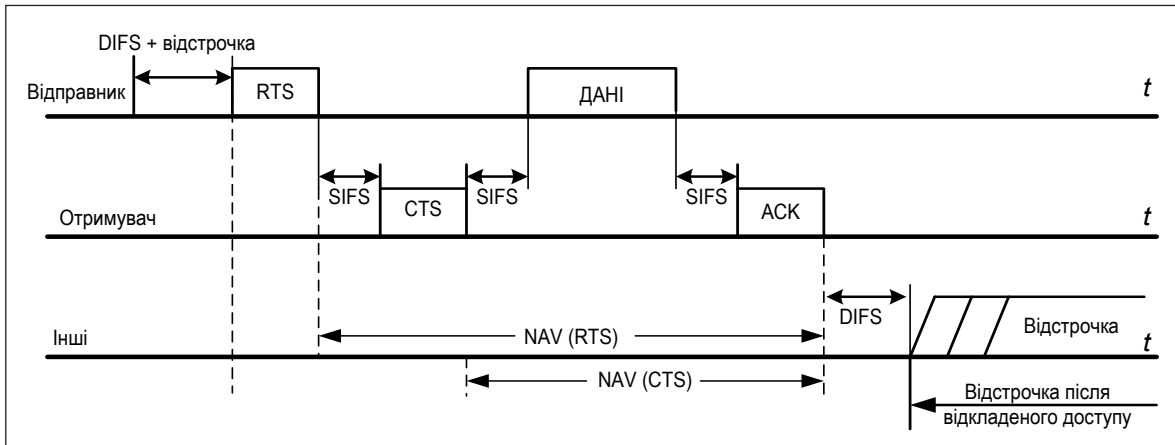


Рис. 2. Часова діаграма функціонування безпроводової мережі стандарту IEEE 802.11 в режимі RTS/CTS

У наведеній на рисунку схемі спільний заголовок додав до корисного навантаження 54 байти: Ethernet/IP/UDP/FCS – 22/20/8/4 (байтів).

Сумарне корисне навантаження одного IP пакета для передавання відеоінформації в даному прикладі становить 1 316 байтів (сім пакетів MPEG2 TS по 188 байтів). Один IP пакет переносить сім пакетів MPEG-2 TS. Це поширена пропорція. Збільшення числа MPEG пакетів в одному IP пакеті, з одного боку, призводить до більш ефективного використання транспортного ресурсу, але з іншого – збільшує джитер (нерівномірність надходження пакетів у точку призначення). Тому вибирають компромісний варіант [7]. Для послуги IP TV або перегляду відео із мережі YouTube зі стандартною роздільною здатністю необхідна швидкість відеопотоку 4–5 Мб/с, а для перегляду відео у форматі високої роздільної здатності (FullHD) – 15 Мб/с [8].

Для оцінювання рівня параметрів відеопотоку розглянемо сценарій, в якому джерело генерує відеопотік SPTS (Single Program Transport Stream – один програмний транспортний потік) з інтенсивністю 4 Мб/с (інтенсивність надходження корисного навантаження). У разі транспортування такого потоку користувачу мережею Ethernet величина одного пакета і обсяг корисного навантаження будуть такі, як наведено на рис. 1. З ура-

хуванням обсягу додаткової інформації в IP пакеті, що надходить користувачу, інтенсивність відеопотоку в мережі Ethernet становитиме 4,164 МГб/с. Швидкість передавання кадрів Ethernet має становити 379, 93 кадрів/с, а періодичність надходження за ідеальних умов – 0,00263 с. Тобто нерівномірність затримки часу передавання має не перевищувати зазначеного періоду.

**Оцінювання реальної швидкості передавання інформації у безпроводовій мережі стандарту IEEE 802.11n.** Оцінимо швидкість передавання інформації в мережі в разі використання одного просторового каналу. Наведені в табл.1 швидкості характеризують процес передавання блоку даних, що міститься безпосередньо в кадрі фізичного рівня. Під час обчислення цих швидкостей не враховано додаткових витрат часу, що мають місце у процесі обміну кадрами даних. На рис. 2 наведено часові діаграми, що характеризують процес передавання кадру даних.

На рис. 2 використано стандартні позначення: DIFS – міжкадровий інтервал режиму DCF, SIFS – короткий міжкадровий інтервал, ACK – кадр підтвердження вдало прийнятого кадру.

Визначимо максимальну пропускну здатність каналу мережі IEEE 802.11n, що має місце за ідеальних умов у разі передавання одного кадру



Рис. 3. Структура преамбули кадру фізичного рівня у змішаному режимі

даних. Під час розрахунку не враховуємо вплив навколишнього середовища, час очікування, обумовлений лічильником зворотного відліку, та втрати часу через колізії, що можуть мати місце під час конкуренції кількох станцій за доступ до каналу. Пропускна здатність визначимо із застосуванням співвідношення:

$$S_{\max_1} = \frac{PL}{T_{acc}}, \quad (1)$$

де  $PL$  – обсяг корисного навантаження одного кадру даних,  $T_{acc}$  – час доступу до каналу для передавання одного кадру даних.

Розрахунок зробимо для змішаного режиму для діапазону 5 ГГц. У цьому режимі в мережі можуть одночасно функціонувати станції IEEE 802.11a та IEEE 802.11n. Преамбула кадру даних містить преамбулу спадкового режиму (20 мкс) та преамбулу режиму швидкісного передавання (HT), рис. 3 [1].

Поля преамбули HT-LTF (довге навчальне поле) передають для кожної антени точки доступу, тобто у разі наявності у точки доступу двох антен у преамбулі буде два таких поля, а тривалість преамбули HT режиму становитиме 28 мкс.

Для розрахунку використано такі стандартні значення часових інтервалів: SIFS = 16 мкс (діапазон 5 ГГц) – короткий міжкадровий інтервал, DIFS = SIFS + 2σ = 16+18 = 34 мкс – міжкадровий інтервал розподіленої функції координатії, σ = 9 мкс – часовий слот очікування, RTS = 20 + 26 = 46 мкс, CTS = 20 + 18 = 38 мкс, ACK = 20 + 24 = 44 мкс – кадр підтвердження успішного приймання кадру даних. Тривалість інтервалу, протягом якого здійснюють безпосередньо передавання блоку даних, визначимо окремо для конкретного значення навантаження (PL).

Зробимо розрахунок для навантаження обсягом 64 байти, 1 500 байтів та агрегованого пакета 4 095 байтів за умови використання схеми модуляції й кодування MCS7 (табл. 1) із використанням частотного каналу 20 МГц.

У цьому режимі для передавання кодованих даних передбачено 52 носійні коливання OFDM символу, тривалість захисного інтервалу 0,4 мкс або 0,8 мкс, тривалість корисного інтервалу 3,2 мкс. Швидкість завадостійкого коду 5/6, спосіб модуляції носійних – QAM-64 (6 бітів кодової інформації на символ).

Визначимо час передавання кадру з корисним навантаженням PL = 64 байти. Крім безпосередньо даних, кадр містить преамбулу, заголовки протоколів різного рівня та контрольну суму. В разі застосування для передавання пакета, що надійшов на точку доступу протоколів Ethernet/UDP/IP, додатковий обсяг інформації складе 54 байти. Сумарне навантаження кадру становитиме 60+54 = 114 байтів. Кількість кодованих бітів, які треба передати, становить PL=114x8x6/5=1095. Кількість OFDM символів, які потрібні для передавання такої кількості інформації становить  $m = 1095/6/52=3,5 \rightarrow 4$  символи. Час передавання чотирьох символів становить  $T_{sym} = (0,4+3,2) \times 4 = 14,4$  (мкс). З урахуванням преамбули (48 мкс) час передавання кадру становитиме 48+14,4 = 62,4 мкс.

Час доступу до каналу для передавання одного кадру даних з PL = 64 байти становить:

$$\begin{aligned} T_{acc} &= \bar{T}_{PL} = DIFS + T_{RST} + SIFS + T_{CST} + SIFS + \\ &+ T_{MPDU} + \dots + SIFS + T_{ACK} \\ &= 34+46+16+38+16+62,4+16+44 = 272,4 \text{ (мкс)}. \end{aligned} \quad (2)$$

Пропускна здатність безпроводового каналу з одним просторовим потоком у разі передавання пакета аудіовізуальних даних з корисним навантаженням PL=64 байти (512 бітів) становитиме  $S_{\max_1} = 512 \text{ (бітів)}/272,4 \text{ (мкс)} = 1,88 \text{ Мб/с}$ .

У разі передавання кадру даних з корисним навантаженням 1 500 байтів (14 919 кодованих бітів, 48 OFDM символів) за тих самих умов швидкість передавання аудіовізуальної інформації становить  $S_{\max_1} = 28,382 \text{ Мб/с}$ . Якщо корисне

навантаження агрегованого пакета становить 4 095 байтів (39 312 кодованих бітів, 128 OFDM символів), тоді  $S_{\max,1} = 48,837$  Мб/с.

Із отриманих результатів можна заключити, що навіть за ідеальних умов, пропускна здатність каналу дуже сильно залежить від величини корисного навантаження, що міститься в пакеті даних.

Для режиму, для якого здійснено розрахунки, швидкість передавання даних у межах кадру фізичного рівня становить 72,2 Мб/с, але розрахункова швидкість передавання корисної інформації безпроводовим каналом становить 1,88 Мб/с (PL = 64 байти), або 28,382 Мб/с (PL=1500 байтів), або 48,837 Мб/с (PL=4095 байтів).

Але реальна швидкість передавання в мережі, в якій одночасно за доступ до каналу конкурують кілька (або багато) станцій, буде ще меншою, оскільки в наведеному розрахунку не враховано час очікування доступу до каналу, обумовлений лічильником випадкової затримки, та втрати часу, обумовлені колізіями, які можуть виникати під час спроби передати кадри RTS.

Для оцінювання реальної пропускної здатності каналу з урахуванням впливу колізій зробимо розрахунки експлуатаційних параметрів мережі із застосуванням концепції віртуального конкурентного вікна [9].

Концепція віртуального конкурентного вікна ґрунтується на загальноприйнятому підході до оцінювання експлуатаційних характеристик безпроводової мережі в насиченому режимі. Згідно з цією концепцією процес передавання кадрів у насиченій мережі розглядають як квазі-стаціонарний процес.

Віртуальне конкурентне вікно VCW – це стохастичний параметр безпроводової мережі стандарту 802.11, який чисельно дорівнює усередненій кількості елементарних часових слотів, протягом яких лічильник зворотного відліку здійснює відлік інтервалу відстрочки після завершення передавання попереднього кадру до початку передавання наступного кадру даних.

Раніше нами були запропоновані співвідношення для розрахунку експлуатаційних параметрів мережі за специфікацією IEEE 802.11a [10]. Співвідношення, що наведені нижче, можна застосувати і для оцінювання експлуатаційних параметрів мережі IEEE 802.11n. У наведених співвідношеннях використано такі позначення:  $CW_{\min}$  – мінімальне значення конкурентного вікна,  $N$  – кількість активних станцій в мережі,

$R$  – кількість можливих повторних спроб передати кадр даних у разі виникнення колізії або пошкодження кадру під час передавання.

Ймовірності колізії для окремої станції за наявності  $N$  активних станцій з насиченим навантаженням буде дорівнювати:

$$p_c = 1 - (1 - p_{c1})^{N-1}, \quad (3)$$

де  $p_{c1} = 1/CW_{\min}$  – ймовірність колізії даної станції з однією з активних станцій безпроводової мережі;  $N$  – кількість активних станцій в мережі, що одночасно конкурують за доступ до каналу передавання даних;  $CW_{\min}$  – початкове значення конкурентного вікна (у специфікації 802.11n  $CW_{\min} = 15$ ).

Величину віртуального конкурентного вікна (VCW) знайдемо із співвідношення:

$$VCW = \frac{CW_1 \cdot (1 - p_c)}{2} \cdot \sum_{i=1}^{m-1} (2p_c)^{i-1}. \quad (4)$$

Кількість вільних від передавання кадрів даних часових слотів під час реалізації віртуального конкурентного вікна буде дорівнювати значенню конкурентного вікна:

$$n_{id} = VCW. \quad (5)$$

Кількість колізій за час реалізації віртуального конкурентного вікна можна визначити із застосуванням співвідношення:

$$n_c = p_c \cdot \frac{N^*}{2} \cdot \frac{1 - p_c^m}{1 - p_c}, \quad (6)$$

де  $N^*$  – кількість активних станцій, що беруть участь в конкуренції за канал в квазістаціонарному режимі. Ітераційне співвідношення для визначення  $N^*$  наведено в [10].

Пропускна здатність безпроводової мережі в насиченому режимі з урахуванням колізій слід визначати з використанням співвідношення:

$$S = \frac{N \cdot E[PL_1] \cdot P_s}{T_{VCW}}, \quad (7)$$

$$T_{VCW} = N \cdot \bar{T}_{PL} + n_c \cdot \bar{T}_c + VCW \cdot \sigma \quad (8)$$

де  $T_{VCW}$  – тривалість часового інтервалу, відповідного віртуальному конкурентному вікну;  $\bar{T}_{PL}$  – тривалість усередненого часового інтервалу, протягом якого відбувається безпосередня передача кадру даних з урахуванням усіх допоміжних сигналів і інтервалів,  $\bar{T}_c$  – тривалість усередненого часового інтервалу колізії,  $P_s$  – повна ймовірність успішного передавання кадру даних.

Ймовірність успішного передавання із використанням  $R$  спроб можна знайти як:

$$P_s = 1 - p_c^R. \quad (9)$$

Графік цієї залежності для випадку  $R = 6$  наведено на рис. 4.

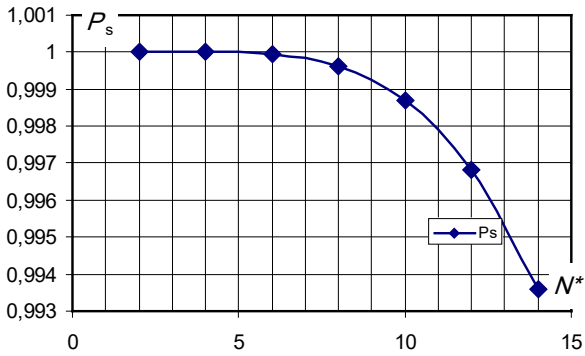


Рис. 4. Графік залежності ймовірності успішного передавання від кількості активних станцій у безпроводовій мережі

Графік залежності кількості станцій  $N^*$ , що безпосередньо беруть участь у конкуренції за доступ до каналу в безпроводовій мережі з  $N$  активними станціями в насиченому режимі з урахуванням процедури подолання колізій наведено на рис. 5.

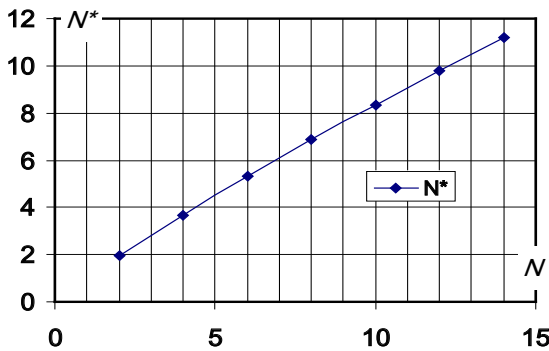


Рис. 5. Залежність кількості конкуруючих станцій  $N^*$  від загального числа активних станцій  $N$  в безпроводовій мережі

Залежність кількості колізій, що мають місце в безпроводовій мережі за час реалізації конкурентного вікна  $VCW$ , за наявності різної кількості активних станцій в мережі наведено на рис.6.

Графік зміни величини віртуального конкурентного вікна  $VCW$  залежно від кількості активних станцій  $N$  в насиченій мережі IEEE 802.11n наведено на рис. 7.

Нижче наведено результати розрахунку пропускної здатності та інших експлуатаційних параметрів безпроводової мережі, що функціонує за специфікацією IEEE 802.11n у змішаному режимі з одним просторовим каналом.

На рис. 8 подано графік залежності (суцільна лінія) максимальної пропускної здатності  $S$  мережі за специфікацією IEEE 802.11n за ідеальних умов (без урахування взаємного впливу активних станцій та зовнішнього середовища) від величини корис-

ного навантаження  $PL$  в кадрі фізичного рівня. У розрахунку враховано максимальну швидкість передавання даних 72,2 Мб/с. Для порівняння наведено також графік залежності пропускної здатності (пунктирна лінія) мережі за специфікацією IEEE 802.11a, яка функціонує з максимальною швидкістю передавання даних у 54 Мб/с.

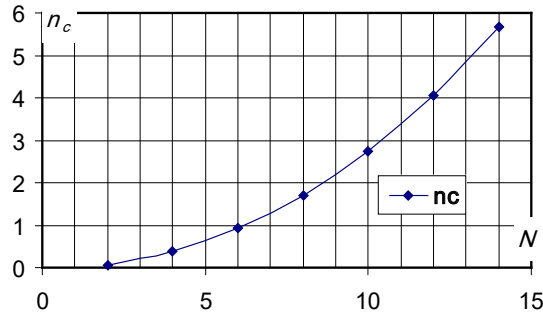


Рис. 6. Залежність кількості колізій  $n_c$  за час реалізації конкурентного вікна  $VCW$  від кількості активних станцій  $N$

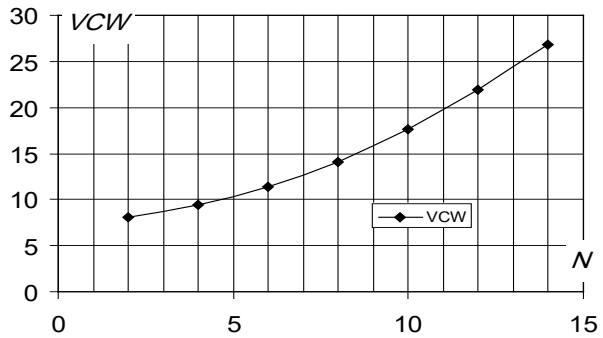


Рис. 7. Залежність величини віртуального конкурентного  $VCW$  вікна від кількості активних станцій  $N$

На рис. 9 наведено графіки залежності пропускної здатності безпроводової мережі IEEE 802.11n від кількості активних станцій в мережі з урахуванням колізій та часу очікування, обумовленого лічильниками зворотного відліку станцій.

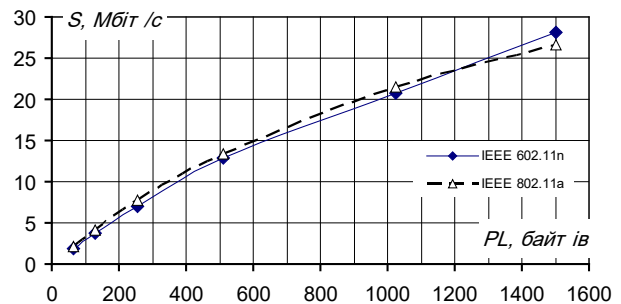


Рис. 8. Залежність максимальної розрахункової пропускної здатності мережі  $S$  від величини корисного навантаження  $PL$

Розрахунок з використанням співвідношення (3) зроблено для трьох величин корисного навантаження: 64, 512 та 1500 байтів.

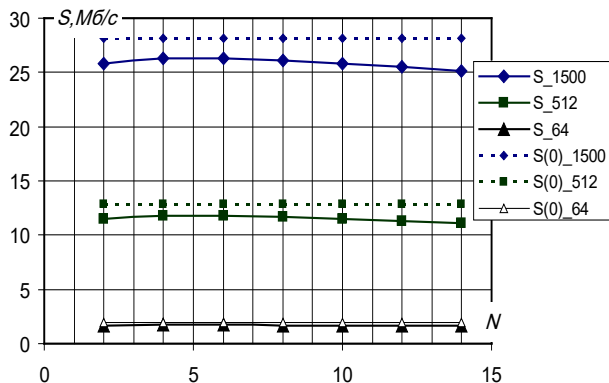


Рис. 9. Залежність пропускної здатності мережі  $S$  від кількості активних станцій  $N$

Пунктирними лініями показано рівень максимальної розрахункової пропускної здатності безпроводової мережі IEEE 802.11n у разі передавання кадрів з однаковим корисним навантаженням; суцільними лініями – розрахунок пропускну здатність з урахуванням колізій та інтервалів очікування.

Графіки залежності пропускної здатності, що припадає на одну активну станцію безпроводової мережі з насиченим навантаженням, від кількості активних станцій  $N$  наведено на рис. 10.

Середній час затримки передавання кадру даних у безпроводовій мережі IEEE 802.11n з насиченим навантаженням дорівнює часу реалізації віртуального конкурентного вікна  $T_{VCW}$ .

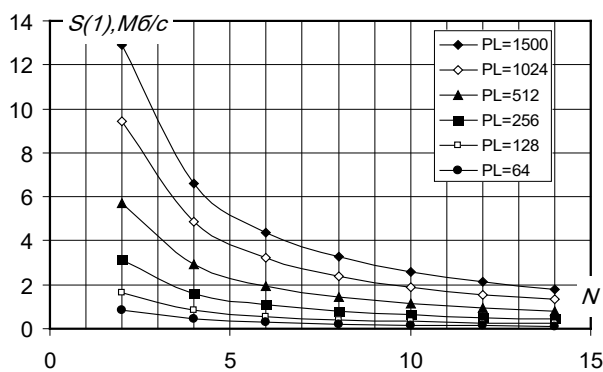


Рис. 10. Залежність пропускної здатності  $S(1)$ , що припадає на одну активну станцію, від кількості активних станцій  $N$

Цей час визначено за співвідношенням (8). Графік залежності середньої затримки  $T_s$  від кількості активних станцій у мережі  $N$  наведено на рис. 11.

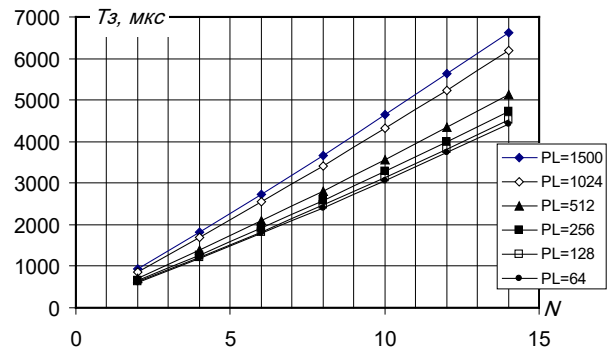


Рис. 11. Залежність середньої затримки передавання кадрів від кількості активних станцій

Значення джитера знайдемо за загальною формулою:

$$\sigma^{(\tau)} = \tau^{(max)} - \tau^{(min)} = 2\sqrt{D(\tau)}, \quad (10)$$

$$\text{де де } \tau^{(max)} = \bar{\tau} + \sqrt{D(\tau)}, \tau^{(min)} = \bar{\tau} - \sqrt{D(\tau)}.$$

Для визначення джитера  $\sigma^{(\tau)}$  скористаємось співвідношенням для дисперсії часу затримки передавання кадрів даних:

$$D(\tau) = \frac{1}{N^{(b)}} \sum_i^{N^{(b)}} (\tau_i - \bar{\tau})^2, \quad (11)$$

де  $N^{(b)}$  – загальна кількість переданих кадрів даних,  $\tau_i$  – затримка передавання окремого кадру даних.

З урахуванням алгоритму подолання колізій вираз (11) набуде іншого вигляду, а саме:

$$D(\tau) = \frac{1}{N^{(b)}} \sum_{j=1}^{m+1} N_j \cdot (\tau_j^* - \bar{\tau})^2, \quad (12)$$

де  $N_j$  та  $\tau_j^*$  – відповідно кількість кадрів даних та усереднена затримка передавання кадру даних через канал під час  $j$ -ої спроби,  $j \in \{1, 2, \dots, R\}$ .

$$N_j = N \cdot p_c^{j-1} \cdot (1 - p_c), \quad (13)$$

$$\bar{\tau} = \frac{1}{2} N^* \cdot (1 - p_c) \cdot \bar{T}_{PL} + \frac{1}{2} n_c \cdot \bar{T}_c + \sigma \cdot \frac{CW_1}{2}, \quad (14)$$

$$\tau_j^* = \tau_1^* \cdot 2^{j-1}, \quad (15)$$

Розраховані значення джитера для двох величин (64 та 1 500 байтів) корисного навантаження в кадрах даних, якими обмінюються станції мережі, наведено на рис. 12.

Мінімальні та максимальні значення джитера для графіків, наведених на рис. 12, такі: у разі корисного навантаження кожного кадру мережі 64 байти,  $\sigma_{min}^{(\tau)}(64) = 371,39$  мкс,  $\sigma_{max}^{(\tau)}(64) = 21214,22$  мкс, а в разі корисного навантаження 1500 байтів,  $\sigma_{min}^{(\tau)}(1500) = 561,36$  мкс,  $\sigma_{max}^{(\tau)}(1500) = 32022,69$  мкс.

Значення ймовірності втрати пакета можна визначити безпосередньо з використанням значення успішного передавання пакета, тобто:

$$P^{(rs)} = 1 - P_s. \quad (16)$$



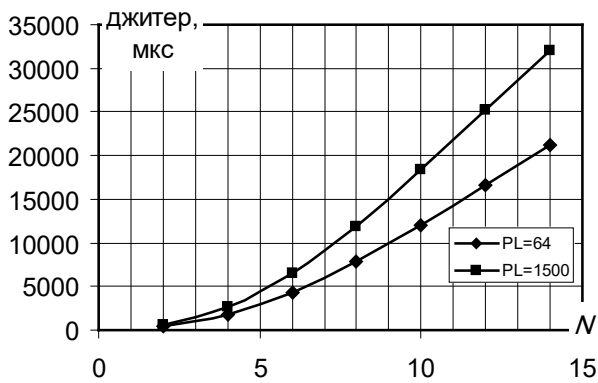


Рис. 12. Залежність нерівномірності затримки передавання кадрів (джитера) від кількості активних станцій  $N$  в мережі

У разі наявності в безпроводовій мережі до 14 активних станцій ймовірність втрати пакета протягом одного повного циклу доступу до безпроводового каналу (шість спроб передати кадр даних у разі спотворення даних під час передавання,  $R = 6$ ) не перевищує значення 0,00641. Для зменшення ймовірності втрати пакета під час передавання безпроводовим каналом провідні компанії, зокрема Cisco, використовували більшу кількість повторних спроб (до 64).

#### Висновки:

1. Пропускна здатність одного просторового каналу безпроводової мережі за специфікацією IEEE

802.11n набагато менше швидкості передавання даних в межах кадру фізичного рівня, що обумовлено колізіями, інтервалами очікування та непродуктивними витратами часу, пов'язаними з передаванням заголовків мережних протоколів різних рівнів та службовою інформацією безпроводової мережі.

2. Використання одного просторового каналу безпроводової мережі IEEE 802.11n у змішаному режимі може забезпечити одночасно до 14 голосових з'єднань з високою якістю надання послуги, оскільки значення якісних показників мережі задовольняють вимоги щодо передавання звукового трафіка (частка пропускної здатності, що припадає на одну станцію, середня затримка та нерівномірність передавання).

3. За ідеальних умов один просторовий канал безпроводової мережі IEEE 802.11n у змішаному режимі може забезпечити одночасне передавання до трьох відеопотоків інтенсивністю 4–5 Мб/с.

4. Найбільш імовірним сценарієм передавання аудіовізуальної інформації в мережі 802.11 є сценарій з використанням одного просторового каналу, що обумовлено наявністю лише однієї антени у абонентських пристроїв.

5. У подальших дослідженнях доцільно оцінити ефективність пріоритизації трафіка в безпроводових мережах з великою кількістю користувачів.

#### Список літератури:

1. Impact of Legacy Devices on 802.11n Networks. Whitepaper, AirMagnet, Inc., 2008, 15 p.
2. Timo Vanhatupa. Wi-Fi Capacity Analysis for 802.11ac and 802.11n: Theory & Practice Ekahau, Inc., 2015, 21 p.
3. Raja Karmakar, Samiran Chattopadhyay, Sandip Chakraborty. Impact of IEEE 802.11n/ac PHY/MAC High Throughput Enhancements over Transport/Application Layer Protocols – A Survey. IEEE Communications Surveys & Tutorials (Volume: 19, Issue: 4, Fourthquarter 2017), Page(s): 2050–2091.
4. Emerging Technologies in Wireless LANs. Theory, Design, and Deployment/ Edited by BENNY BING. – Georgia Institute of Technology, Cambridge University Press 2008. 897p.
5. Визначення змісту понять: «ефект», «ефективність» та «результативність». WEB-ресурс научно-практичних конференцій. URL: [http://www.confcontact.com/20121221/3\\_gupalo.htm](http://www.confcontact.com/20121221/3_gupalo.htm) (дата звернення 10.05.2018]
6. VoIP – потребление полосы пропускания в расчете на вызов. URL: [https://www.cisco.com/cisco/web/support/RU/106/1068/1068305\\_bwidth\\_consume.html](https://www.cisco.com/cisco/web/support/RU/106/1068/1068305_bwidth_consume.html) (дата звернення 10.05.2018].
7. Анна Бителева. Цифровое кабельное ТВ / Теле-Спутник №10(144) Октябрь 2007 г. С.112–119.
8. Барг А.И., Колгатин С.Ю., Колпаков И.А. IP\_телевидение. Главные станции / T-Comm №1-2(2007). С. 37–43.
9. Lazebnyy A.V. The Details of Virtual Contention Window Concept for 802.11 IBSS Wireless Local Area Network Mathematic Modeling /A.V. Lazebnyy and V. S. Lazebnyy//International Journal of Wireless Communications and Mobile Computing vol. 1. №1. с. 7–13. URL: <http://doi.org/10.11648/j.wcmc.20130101.12>
10. Ін Ченлян, В. С. Лазебний. Застосування концепції віртуального конкурентного вікна для прогнозування пропускної здатності сегмента безпроводової мережі Wi-Fi. Том 4, № 60 (2017). С. 30–38

### **ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЕРЕДАЧИ АУДИОВИЗУАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ СРЕДСТВАМИ БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЕЙ 802.11N**

*В статье приведены результаты исследований эксплуатационных характеристик беспроводной сети IEEE 802.11n, работающей в смешанном режиме с использованием одного пространственного канала в частотной полосе 20 МГц. Проанализированы требования относительно параметров передачи аудиовизуальной информации в IP сети. В статье приведены результаты расчетов пропускной способности, вероятности возникновения коллизий и вероятности успешной передачи кадра данных в насыщенной сети, получены значения среднего времени задержки и неравномерности передачи пакетов. Расчетные соотношения разработаны на основе концепции виртуального конкурентного окна. По результатам расчетов сделаны оценки относительно эффективности применения сети IEEE 802.11n для передачи аудиовизуальной информации.*

**Ключевые слова:** аудиовизуальная информация, беспроводная сеть, виртуальное конкурентное окно, коллизия, конкурентный доступ, полезная нагрузка, режим RST / CST.

### **EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF TRANSMISSION OF AUDIOVISUAL INFORMATION BY MEANS OF 802.11N WIRELESS NETWORK**

*The results of characteristics research of the wireless network of IEEE 802.11n, which operates in a mixed mode using a single spatial channel in a 20 MHz frequency band, are described in this paper. The requirements for the parameters of audiovisual information transmission in IP networks are analyzed. The paper presents the results of calculations of the network throughput, the probability of occurrence of collisions and the probability of successful transfer of the data frame in the saturated network, obtained a mean delay time and uneven transmission of packets. The calculation equations are based on the concept of a virtual contention window. Based on the results of the calculations, estimates were made regarding the efficiency of the application of the network in accordance with the IEEE 802.11n for the transmission of audio-visual information.*

**Key words:** audiovisual information, wireless network, virtual contention window, collision, competitive access, payload, RST/CST mode.

**Семенов А.О.**

Вінницький національний технічний університет

## ОПТИМІЗАЦІЯ ТРАНЗИСТОРНОГО ГЕНЕРАТОРА КИЯШКА-ПІКОВСЬКОГО-РАБІНОВИЧА ЗА ІНФОРМАЦІЙНИМИ ПАРАМЕТРАМИ ХАОТИЧНИХ СИГНАЛІВ

У роботі наведено результати теоретичних досліджень і чисельного розрахунку статистичних та інформаційних параметрів хаотичних сигналів. Розглянуто генератор детермінованого хаосу типу Кияшко-Піковського-Рабіновича на основі біполярної транзисторної структури з від'ємним опором. Отримано графічні залежності характеристикних показників Ляпунова автоколивальної системи генератора від її параметрів. Проведено чисельні розрахунки коефіцієнтів взаємної кореляції та автокореляції хаотичних сигналів. Отримано результати розрахунків ентропії та фрактальної розмірності генерованих хаотичних сигналів. Здійснено оптимізацію параметрів автоколивальної системи генератора по максимуму ентропії хаотичних сигналів.

**Ключові слова:** генератор, транзисторна структура, від'ємний опір, математична модель, хаотичний сигнал, показники Ляпунова.

**Постановка проблеми.** Упродовж трьох останніх десятиліть спостерігається зростаючий інтерес до пошуку нових методів і засобів побудови генераторів детермінованого хаосу для практичного застосування в радіоелектронних та інфокомунікаційних системах. Сьогодні відомо багато методів і способів передавання інформації за допомогою сигналів детермінованого хаосу [1, с. 38–42]. Це зумовлено тим, що хаотичні сигнали мають такі специфічні властивості [2]: 1) складність форми і неперіодичність; 2) широкосмуговість; 3) велику інформаційну ємність; 4) підвищену завадостійкість. Вітчизняні публікації в напрямі дослідження інформаційних параметрів і характеристик хаотичних сигналів відомі мало. Ще менше уваги приділено питанням розвитку теорії синтезу та оптимізації пристроїв генерування та формування сигналів детермінованого хаосу за критерієм максимальної інформаційної місткості. Це зумовлює актуальне науково-технічне завдання створенню нових і удосконалення відомих методів оптимізації існуючих генераторів детермінованого хаосу по максимуму інформаційних властивостей сигналів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Відомо безліч публікацій, присвячених розробленню та дослідженню пристроїв генерування та формування сигналів детермінованого хаосу для практичного застосування в надширокосмугових радіоелектронних та інфокомунікаційних системах [3–5]. Детально опрацьовано питання синхронізації хаотичних генераторів для побудови систем передавання інформації [6]. Системи

передавання інформації за допомогою хаотичних сигналів базуються на здійсненні синхронізації між ведучою та веденою хаотичними автоколивальними системами [6]. Усі відомі системи передавання інформації можна поділити на такі групи залежно від видів синхронізації [6]: 1) повна синхронізація; 2) фазова синхронізація; 3) узагальнена синхронізація. У кожній із цих груп можуть бути застосовані такі способи передавання інформації за допомогою хаотичних сигналів [6]: хаотичне маскування (chaotic masking), перемикання хаотичних режимів (chaotic shift keying), нелінійне підмішування інформаційного сигналу до хаотичного (nonlinear signal mixing), застосування структури фазового автоматичного підстроювання (PLL), модуляція параметрів передавача у поєднанні з адаптивними методами приймання (adaptive methods). Для практичної реалізації зазначених способів передавання інформації потрібно оцінити відомі генератори детермінованого хаосу за статистичними та інформаційними параметрами сигналів. Результати інтегральної оцінки великої кількості (84) генераторів хаосу за кореляційними та спектральними властивостями сигналів наведені в роботі [2]. Водночас питання інтегральної оцінки інформаційних параметрів і властивостей генераторів детермінованого хаосу не розглянуто.

**Постановка завдання.** Метою роботи є дослідження статистичних та інформаційних параметрів автоколивальної системи транзисторного генератора Кияшко-Піковського-Рабіновича (далі – КПП) та оптимізація параметрів за критерієм максимуму ентропії хаотичних сигналів. Для

досягнення поставленої мети у роботі потрібно вирішити такі завдання: 1) отримати спектр старших показників Ляпунова автоколивальної системи генератора залежно від її параметрів; 2) здійснити обчислення інформаційних і статистичних параметрів хаотичних сигналів; 3) здійснити оптимізацію режиму роботи генератора по максимуму ентропії хаотичних сигналів; 4) зробити висновки з проведеного дослідження.

**Виклад основного матеріалу дослідження.**

У теорії інформації поняття ентропії введено для систем, які можуть знаходитися в різних станах  $x_i$  з різною ймовірністю  $p_i = p(x_i)$  [7, стор. 67]. За Шенноном стан невизначеності інформаційної системи характеризується ентропією так [7, с. 67]:

$$H = -\sum_i p_i \log p_i. \quad (1)$$

Мірою інформації, яка міститься в повідомленні, є зміна ентропії [7, с. 67].

Крім класичної шеннонівської ентропії для аналізу інформаційних властивостей хаотичних систем застосовують узагальнену ентропію Реньї  $H_q$  порядку  $q$  [8, с. 1322]

$$H_q = \frac{1}{1-q} \log \left( \sum_i p_i^q \right). \quad (2)$$

Під час граничного переходу за умови  $q \rightarrow 1$  рівняння (2) перетворюється до вигляду рівняння (1). Тобто ентропія Шеннона є частковим випадком узагальненої ентропії Реньї [8, с. 1322].

Аналіз стану генераторів детермінованого хаосу виконують методами фазової площини [3; 4]. Фазові портрети генераторів детермінованого хаосу в площинах і просторах динамічних змінних мають вигляд дивного атратора [3; 4]. Експоненціальне збільшення відстані двох початково близьких траєкторій визначається характеристичними показниками Ляпунова [7, с. 110]. Швидкість розходження великої кількості нескінченно близьких траєкторій визначається ентропією динамічної системи. Тобто ентропія – це кількість інформації, необхідна для визначення місця розташування системи у деякому її стані, тобто міра незнання о системі [7, с. 110].

Із загальної теорії систем динамічного хаосу відомі такі типи ентропії [7, с. 111–115]: 1) метрична (Колмогорова); 2) каскада (Колмогорова-Сіная); 3) узагальнена (ентропія Реньї); 4) топологічна.

Величина ентропії динамічної системи безпосередньо пов'язана з характеристичними показниками Ляпунова. При цьому від'ємні характеристичні показники Ляпунова не роблять внесок до загальної величини ентропії. Ентропія хаотичних систем визначається лише додатними показниками Ляпунова [7, с. 116]

$$H = \int_A \left[ \sum_{\lambda_i(x) > 0} \lambda_i(x) \right] dA. \quad (3)$$

У рівнянні (3) здійснюється додавання усіх додатних характеристичних показників Ляпунова, а інтеграл береться по деякій інваріантній області фазового простору динамічної системи. Ентропія розуміється деякою характеристикою однієї стохастичної компоненти системи. У цьому разі характеристичні показники Ляпунова не залежать від траєкторії фазового портрету, а тому інтеграл у (3) дорівнює одиниці [7, с. 116]. Таким чином, величина ентропії Колмогорова-Сіная хаотичної системи визначається алгебраїчною сумою додатних характеристичних показників Ляпунова [8, с. 1322]

$$H = \sum_{\lambda_i(x) > 0} \lambda_i(x). \quad (4)$$

Поняття фрактальної розмірності тісно пов'язане з Ляпуновською розмірністю [7, с. 136], яка визначається за формулою

$$d_{L1} = j + \sum_{i=1}^j \frac{\lambda_i}{|\lambda_{j+1}|}, \quad (5)$$

де усі характеристичні показники Ляпунова впорядковані по зростанню

$$\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_n,$$

$n$  – розмірність фазового простору, а число  $j$  – визначається з таких умов

$$\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_j \geq 0, \quad \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_{j+1} < 0. \quad (6)$$

Носіями інформації в інфокомунікаційних і телекомунікаційних системах є електричні сигнали. Під час оброблення хаотичних електричних сигналів важливими параметрами є коефіцієнти взаємної кореляції або автокореляції.

Під час статистичної обробки випадкових сигналів  $X(t)$ , які спостерігаються в проміжку часу від 0 до  $T$  застосовують наближену взаємну кореляційну функцію [9, с. 47]

$$R_{X1X2} = \frac{1}{T-\tau} \int_0^{T-\tau} x_1(t)x_2(t+\tau)dt, \quad (7)$$

при  $0 \leq \tau \ll T$ . Виконати аналітично інтегрування у (7) неможливо, тому обчислення здійснюють для випадку дискретних вибірок  $x_1(t)$  і  $x_2(t)$  випадкових процесів  $X1(t)$  і  $X2(t)$  [9, стор. 49]

$$R_{X1X2}(n\Delta t) = \frac{1}{N-n+1} \sum_{k=0}^{N-n} X1_k X2_{k+n}, \quad (8)$$

де  $\Delta t$  – крок вибірки,  $n = 0, 1, 2, \dots, M$  і  $M \ll N$ .

Безрозмірний коефіцієнт взаємної кореляції розраховують по формулі [9, с. 49]

$$\rho = \frac{R_{X1X2}(\tau)}{\sigma_{X1}\sigma_{X2}}, \quad (9)$$

де  $\sigma_{X1}$  і  $\sigma_{X2}$  – це стандартні відхилення випадкових величин  $X1(t)$  і  $X2(t)$  відповідно.

Електрична схема генератора Кіяшко-Піковського-Рабіновича на біполярній транзисторній структурі з від'ємним опором наведена на рис. 1.

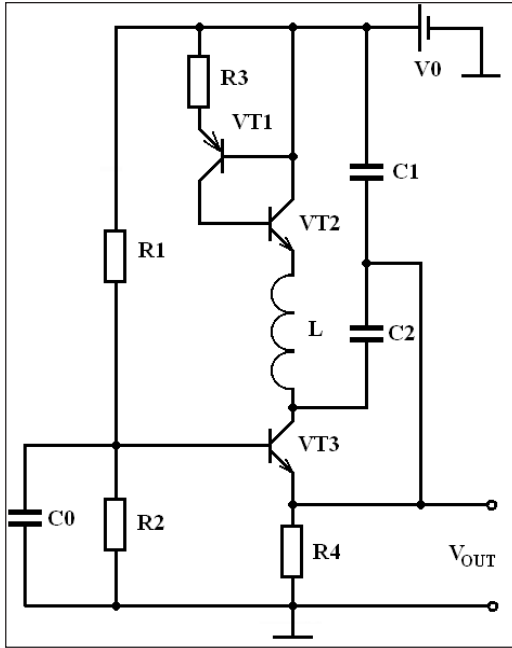


Рис. 1. Електрична схема генератора Кіяшко-Піковського-Рабіновича на біполярній транзисторній структурі з від'ємним опором

Математична модель динамічних процесів у генераторі має вигляд [10]

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{d\tau} = 2hx_1 + x_2 - gx_3 + dx_1 \cdot x_2^2, \\ \frac{dx_2}{d\tau} = -x_1, \\ \varepsilon \frac{dx_3}{d\tau} = x_1 - f(x_3), \end{cases} \quad (10)$$

де рівняння апроксимація статичної ВАХ біполярної транзисторної структури VT1-VT2 кубічним поліномом [10]

$$f(x_3) = -1.143 \cdot 10^{-3} + 6.972x_3 - 14.382x_3^2 + 7.439x_3^3, \quad (11)$$

рівняння нормованих змінних

$$x_1 = \frac{I}{I_m}, \quad x_2 = UI_m \sqrt{\frac{C}{L}}, \quad x_3 = \frac{V}{V_m}, \quad (12)$$

рівняння коефіцієнтів системи

$$2h = R\sqrt{\frac{C}{L}}, \quad g = \frac{V_m}{I_m} \sqrt{\frac{C}{L}}, \quad \varepsilon = \frac{gC(V)}{C}, \quad C = \frac{C_1C_2}{C_1 + C_2}, \quad \tau = \omega_0 t, \quad (13)$$

де  $I_m, V_m$  – параметри апроксимації статичної ВАХ транзисторної структури VT1-VT2;  $d$  – коефіцієнт, який урахує нелінійні властивості вихідних характеристик підсилювача на VT3 ( $d = 0, 02 \dots 0, 03$ ).

Моделльне дослідження динамічних процесів у автоколивальній системі генератора КПП здійснено за допомогою програми DEREK [11]. Програма DEREK обчислює частину спектрів показників Ляпунова (не більше перших 4-х) використовуючи чисельний ітераційний алгоритм Бенеттіна [11].

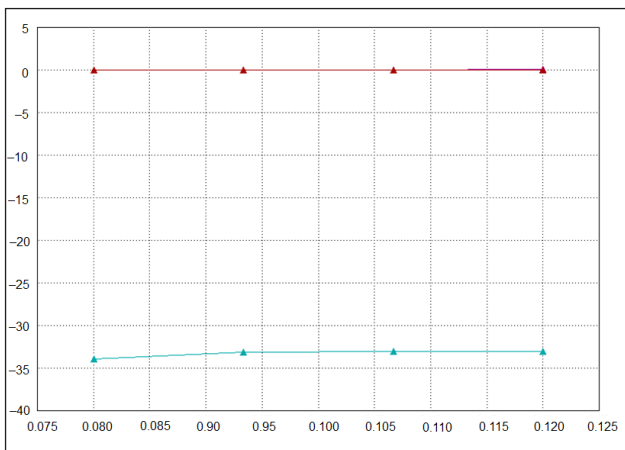
На рис. 2 наведено спектри показників Ляпунова залежно від зміни коефіцієнтів динамічної системи генератора КПП для режиму багатовиткового атрактору при параметрах коефіцієнтів системи  $h=0.107$  і  $g=0.957$ . Як видно з рис. 2, максимальне значення старшого показника Ляпунова забезпечується при  $h=0.115$  і  $g=0.775$ . За цих умов старші показники Ляпунова мають величини  $\lambda_1=1.248745 \cdot 10^{-1}$ ,  $\lambda_2=3.5648753 \cdot 10^{-2}$ ,  $\lambda_3=-3.1117128 \cdot 10^1$ .

Для динамічної системи третього порядку рівняння Ляпуновської розмірності (5) з урахуванням вимог (6) має вигляд

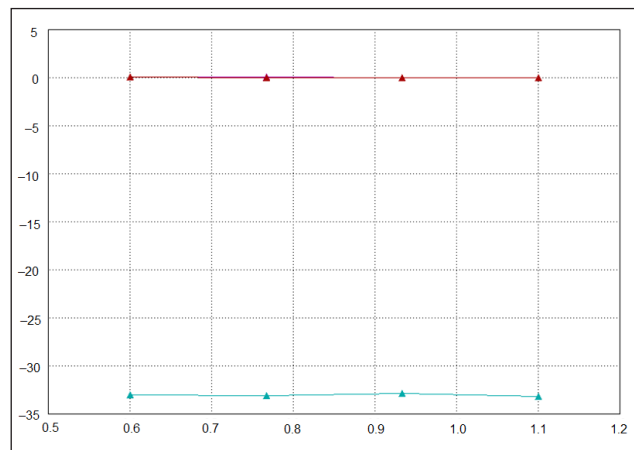
$$d_{L1} = 2 + \frac{\lambda_1}{|\lambda_3|} \quad (14)$$

і повністю збігається з фрактальною розмірністю  $d_F$ .

Ентропія Колмогорова-Сіная хаотичних сигналів оптимізованого генератора КПП на рис. 1 становить



а)



б)

Рис. 2. Графіки характеристичних показників Ляпунова при зміні коефіцієнтів система: а)  $h=0.08 \dots 0.12$ , б)  $g=0.6 \dots 1.1$

$$H = \sum_{\lambda_i(x) > 0} \lambda_i(x) = \lambda_1 + \lambda_2 = 0.1605,$$

а фрактальна розмірність

$$d_f = d_{L1} = 2 + \frac{\lambda_1}{|\lambda_3|} = 2.004.$$

Коефіцієнти взаємної кореляції хаотичних сигналів оптимізованого генератора КПП на рис. 1 обчислено за допомогою стандартної функції corr (X1,X2) програми MathCad 15.0 і становлять

$$\rho(X1, X2) = 1.12206 \cdot 10^{-3}, \quad \rho(X1, X3) = 0.53444,$$

$$\rho(X2, X3) = -0.26089.$$

**Висновки.** У роботі отримано результати теоретичних досліджень і математичного моделювання автоколебальної системи генератора

Кияшка-Піковського-Рабиновича на основі біполярної транзисторної структури з від'ємним опором. Отримано результати чисельних розрахунків статистичних та інформаційних параметрів генерованих хаотичних сигналів. У порівнянні з хаотичним генератором Колпитця [12], сигнали якого мають ентропію  $H=0,1292$  і фрактальну розмірність  $d_f=2,1123$ , хаотичний генератор КПП на основі біполярної транзисторної структури з від'ємним опором має кращі інформаційні властивості, але поступається як за частотним діапазоном, так і спектральними характеристиками. Як на переваги дослідженого хаотичного генератора КПП, слід зазначити його сумісність з інтегральною технологією та високим рівнем амплітуди генерованих хаотичних напруг і струмів.

#### Список літератури:

1. Бобало Ю.Я., Галюк С.Д., Климаш М.М., Політанський Р.Л. Прикладне застосування теорії хаотичних систем у телекомунікаціях: монографія. Дрогобич – Львів: Коло, 2015. 184 с.
2. Голевич О.Б., Пивовар О.С., Троцишин І.В. Впорядкування ансамблів хаотичних сигналів та способи їх використання в над широкосмугових телекомунікаційних системах. Цифрові технології. 2015. Вип. 17. С. 182–192. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/ct\\_2015\\_17\\_24](http://nbuv.gov.ua/UJRN/ct_2015_17_24)
3. Генерация хаоса / Дмитриев А.С., Ефремова Е.В., Максимов Н.А., Панас А.И.; под общ. ред. Дмитриева А.С. Москва: Техносфера, 2012. 424 с.
4. Шахтарин Б.И., Кобылкина П.И., Сидоркина Ю.А., Кондратьев А.В., Митин С.В. Генераторы хаотических колебаний: учебн. пособие. Москва: Гелиос АРВ, 2014. 248 с.
5. М. Р. Kennedy, R. Rovatti, G. Setti. Chaotic Electronics in Telecommunications. London, CRC Press, 2000. 438 p.
6. Короновский А.А., Москаленко О.И., Храмов А.Е. О применении хаотической синхронизации для скрытой передачи информации. Успехи физических наук. 2009. Т. 179, № 12. С. 1281–1310. DOI: 10.3367/UFNr.0179.200912c.1281.
7. Шашихин В.Н. Хаос и нелинейная динамика. Регулярная и хаотическая динамика: учеб. пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. 210 с.
8. Лоскутов А.Ю. Очарование хаоса. Успехи физических наук. 2010. Том. 180, № 12. С. 1305–1329. DOI: 10.3367/UFNr.0180.201012c.1305.
9. Вохник О.М., Зотов А.М., Короленко П.В., Рьжикова Ю.В. Моделирование и обработка стохастических сигналов и структур. Учебное пособие. Москва: Университетская книга, 2013. 125 с.
10. Семенов А.О. Генератор детерминированного хаосу Кияшко-Піковського-Рабиновича на основі біполярної транзисторної структури з від'ємним опором. Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. 2017. № 3. С. 76–82.
11. DEREK-ODE – Исследование динамических систем. URL: <http://derek-ode.syto.com/>
12. Семенов А.О. Транзисторні генератори детермінованого хаосу за схемою Копитця. Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. 2017. № 1. С. 223–232.

#### ОПТИМИЗАЦИЯ ТРАНЗИСТОРНОГО ГЕНЕРАТОРА КИЯШКО-ПИКОВСКОГО-РАБИНОВИЧА ПО ИНФОРМАЦИОННЫМ ПАРАМЕТРАМ ХАОТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

*В работе приведены результаты теоретических исследований и численного расчета статистических и информационных параметров хаотических сигналов. Рассмотрен генератор детерминированного хаоса типа Кияшко-Пиковского-Рабиновича на основе биполярной транзисторной структуры с отрицательным сопротивлением. Получены графические зависимости показателей Ляпунова автоколебательной системы генератора от ее параметров. Проведены многочисленные расчеты коэффициентов взаимной корреляции и автокорреляции хаотических сигналов. Получены результаты расчетов энтропии и фрактальной размерности генерируемых хаотических сигналов. Осуществлена оптимизация параметров автоколебательной системы генератора по максимуму энтропии хаотических сигналов.*

**Ключевые слова:** генератор, транзисторная структура, отрицательное сопротивление, математическая модель, хаотический сигнал, показатели Ляпунова.

**KIYASHKO-PIKOVSKY-RABINOVICH TRANSISTOR OSCILLATOR OPTIMIZATION  
BY INFORMATION PARAMETERS OF CHAOTIC SIGNALS**

*The paper presents the theoretical research and numerical calculation results for statistic and information parameters of chaotic signals. A deterministic chaos oscillator of Kiyashko-Pikovsky-Rabinovich type based on a transistor structure with negative resistance has been considered. Graphical dependences for Lyapunov characteristic exponents of the self-oscillatory system on its parameters have been obtained. Cross and auto-correlation coefficients of chaotic signals have been numerically calculated. Entropy and fractal dimensionality of the generated chaotic signals have been calculated. The self-oscillatory system parameters have been optimized by the entropy maximum of chaotic signals.*

**Key words:** oscillator, transistor structure, negative resistance, mathematical model, chaotic signal, Lyapunov exponents.

## ІНФОРМАТИКА, ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ

УДК 004.055

**Андрущенко В.Б.**

Інститут проблем реєстрації інформації НАН України

### ПІДХОДИ ДО ВИЗНАЧЕННЯ КРИТЕРІЇВ ДЛЯ АНАЛІЗУ ONLINE РЕСУРСІВ НАУКОВОЇ ІНФОРМАЦІЇ

*Стаття присвячена способам визначення критеріїв для проведення аналізу масиву онлайн ресурсів наукової інформації для формування узагальненої картини інформаційних ресурсів доступу до наукової інформації і визначення основних характеристик ресурсів з точки зору відкритості, наповнення та доступності інформації. Надано визначення поняття систематизації ресурсів наукової інформації. Окреслено перспективи розвитку дослідження для подальшого формування вимог до побудови систем наукової інформації.*

**Ключові слова:** наукова інформація, критерії аналізу систем, користувач наукової інформації.

**Постановка проблеми.** Сучасне інформаційне суспільство висуває значні вимоги до усіх сфер людської діяльності, адже доступність інформації визначає швидкість роботи з нею, обробки та переадресації чи подальшого її використання.

Всі напрями діяльності людини сьогодні тісно пов'язані з інформаційними технологіями та глобальними мережами.

Крім локальних програмних продуктів, передбачених окремими організаціями та інституціями, питання інформатизації вирішується на державному рівні шляхом створення систем роботи, оприлюднення, інформування, внесення, обробки інформації та іншого. Також формується загальнодержавна програма і в деяких напрямках життєдіяльності людини, політики щодо відкритості інформації, приватності та захисту персональних даних в аспекті неоприлюднення тієї чи іншої інформації.

Одним із яскравих прикладів розвитку такої політики є запровадження нових загальних норм із захисту даних в Європейському Союзі [1]. Запровадження нових норм так само передбачає зміни у політиках поширення інформації в соціальних мережах, наприклад відповідні анонси було оприлюднено для користувачів Twitter [2]. Також відповідні зміни відбулися для користувачів одного з найбільших сервісів мережі Інтернет – Google [3].

Водночас необхідно звернути увагу на відповідні політики щодо відкритого доступу. Кожна країна визначає свої політики щодо відкритих даних і способу їх оприлюднення. Для Укра-

їни набори даних, що мають бути оприлюднені у відкритому доступі, визначаються Постановою Кабінету Міністрів України від 21 жовтня 2015 року № 835 «Про затвердження Положення про набори даних, які підлягають оприлюдненню у формі відкритих даних» [4]. Цим документом визначаються всі аспекти оприлюднення відкритих даних, зокрема терміни, учасники, паспорти наборів тощо.

Значне місце у просторі відкритих даних та порядку їх регулювання займає наукова інформація, а саме: наукові публікації та наукові данні.

За загальним формулюванням, відкритий доступ передбачає вільну безкоштовну і безперешкодно он-лайн публікацію результатів досліджень із можливістю застосування ліцензій Creative Commons (<https://creativecommons.org/>) до розміщеного матеріалу [5].

Наприклад, грантові програми різноманітних напрямів і способів підтримки наукових досліджень передбачають публікацію результатів досліджень та розміщення у відкритому доступі даних, отриманих в результаті проведення дослідження. Такі вимоги чітко окреслені в методичних матеріалах для учасників програми Горизонт-2020 – найбільшій програмі Європейського Союзу з досліджень та інновацій [6].

Водночас відкритість тієї чи іншої наукової інформації визначається політиками програм, видавництв, університетів, організацій, що опікуються цією інформацією.



Сьогодні в мережі Інтернет налічується значна кількість ресурсів, що передбачають як відкритий, так і передплатений доступ до наукової інформації та наукових даних. Відповідно, кожен ресурс передбачає власні політики щодо публікацій та умов розміщення інформаційних масивів або наборів даних на ресурсах.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В англійському сегменті наукових публікацій протягом останніх 3 років увага авторів та дослідників була зосереджена на таких питаннях та способах систематизації ресурсів наукової інформації:

1. Підходи до формування інтелектуальних наукових інтернет-ресурсів [7].
2. Дослідження інформаційних ресурсів як один із нових наукових напрямів, що передбачає оцінку наукових ресурсів [8].
3. Нові підходи щодо систематизації досліджень, що базуються на підході «Big Data» [9].
4. Формування кількісного та якісного дискурсу щодо використання даних як дослідницької техніки [10].
5. Формування систематизованої структури оцінки ефективності користування наукових ресурсів [11].
6. Окреслення підходів щодо використання та обробки великих масивів інформації з огляду на спрямованість сьогодення [12].

В україномовному сегменті тематика наукових робіт зосереджена в публікаціях напряму інформаційно-бібліотечної діяльності, зокрема в них піднімаються такі питання:

1. Формування та використання електронних ресурсів наукової та освітньої інформації [13].
2. Питання формування, впорядкування та управління в контексті бібліотечних інформаційних ресурсів, що містять посилання на ресурси наукової інформації, тощо [14].
3. Особливості розробки критеріїв оцінювання електронних ресурсів освітнього напрямку [15].
4. Проблема захисту наукових ресурсів [16].

Таким чином, можна зауважити, що роботи щодо систематизації або формування підходів до систематизації наукових ресурсів та визначення критеріїв для аналізу та оцінки ресурсів наукової інформації з точки зору доступності і контенту не проводились. Водночас матеріали досліджень, що присвячені способам розгляду наукових та освітніх ресурсів, стали підґрунтям у формуванні підходів до способів систематизації зазначених систем та способів визначення критеріїв для подальшої роботи. Питання аналізу ресурсів або визначення критеріїв для аналізу ресурсів

зосереджено на особливостях розробки критеріїв для оцінювання електронних освітніх ресурсів з метою підвищення якості знань [17].

**Постановка завдання.** З огляду на актуальність поставленої задачі та наявність в глобальних мережах великих масивів ресурсів наукової інформації, важливим постає питання систематизації таких ресурсів та визначення основних характеристик з урахуванням наповнення та способу розробки систем. Йдеться про достатність інформації та врахування орієнтованості щодо користувача. Визначення критеріїв для аналізу та оцінки зазначених ресурсів надає можливість також здійснити опис ресурсів наукової інформації з точки зору її доступності та наповнення. Це, на нашу думку, дозволить не тільки орієнтуватися у масиві ресурсів, що наразі є доступними користувачам мережі Інтернет, а й вдосконалювати наявні системи та визначити перелік даних відповідно до задачі тієї чи іншої системи з огляду на вимоги щодо розробки інформаційних систем та користувацького інтерфейсу зокрема.

Під систематизацією розуміємо виокремлення спільних ознак систем глобальної мережі Інтернет, що містять наукову інформацію в різних наборах, способах та обсягах її представлення, для формування єдиної системи ресурсів наукової інформації.

Обсяг ресурсів та визначення переліку критеріїв для аналізу, опису та оцінки ресурсів наукової інформації, роботу з якими було проведено для реалізації поставленої задачі, дозволить описати систему ресурсів наукової інформації та результати досліджень, що може виступити зручним інструментом не тільки під час формування порядку проведення власного дослідження, а також в процесі формування стратегії оприлюднення результатів дослідження та отриманих наукових даних під час подання запитів на гранти.

Основними завданнями дослідження було розробити модель, що дозволить виокремити низку показників, за якими буде проводитися аналіз ресурсів наукової інформації для проведення оцінки ресурсу з урахуванням відкритості даних, способу представлення інформації, варіантів наборів даних, що представлені в ресурсі.

**Виклад основного матеріалу.** Для реалізації поставленої задачі було проведено наступні етапи:

1. Запропоновано представлення наукової інформації у вигляді мережі, елементами якої є користувачі інформації, способи представлення наукової інформації, способи доступу до неї, деталізація контенту.

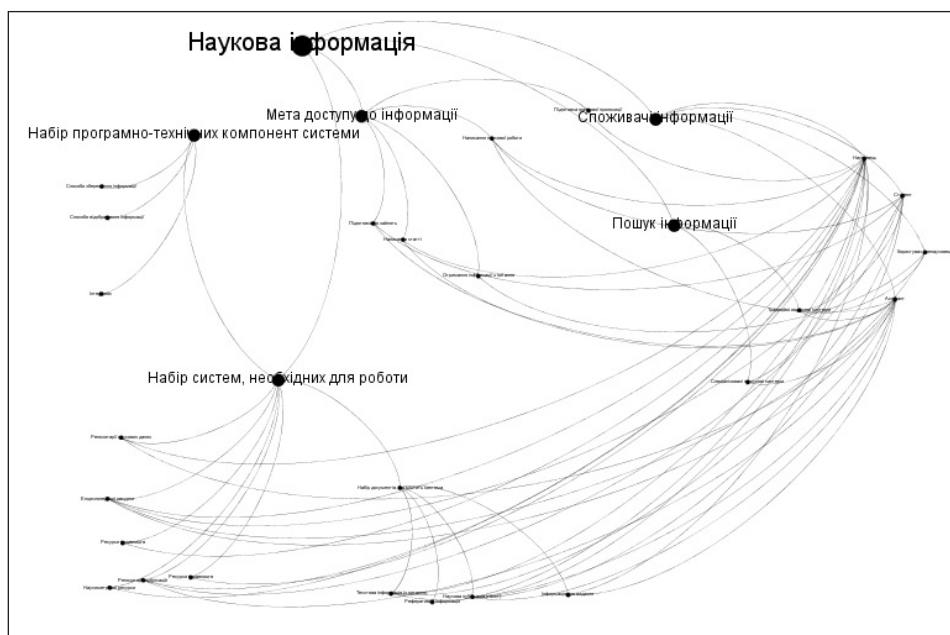


Рис. 1. Мережа, що представляє основні компоненти наукової інформації, в контексті її представлення в мережі Інтернет

2. Експертним шляхом було виокремлено ресурси, що містять наукову інформацію (результати досліджень – наукові дані, препринти наукових публікацій, наукові публікації, реферативна інформація щодо наукових публікацій, наукометричні показники). Проаналізовано спосіб представлення інформації та способи пошуку інформації в рамках ресурсу.

3. Визначено спільні ознаки як контенту ресурсів різного спрямування, так і способу представлення інформації.

4. Відповідно до аналізу зв'язків мережі, виокремлено критерії для опису та аналізу ресурсів наукової інформації.

Автором були представлені компоненти, що характеризують наукову інформацію в контексті її презентації в мережі Інтернет, споживачів цієї інформації, складових частин наукової інформації та зв'язків між цими компонентами у вигляді графа (рис. 1).

Мережа містить наступні основні вузли та елементи:

1. Набір систем, необхідних для роботи (енциклопедичні ресурси, ресурси видавництва, репозитарії публікацій, наукометричні ресурси, репозитарії наукових даних).

2. Набір програмно-технічних компонентів системи (інтерфейс, способи відображення інформації, способи збереження інформації).

3. Споживачі інформації (користувач-не науковець, студент, аспірант, науковець).

4. Мета доступу до інформації (отримання інформації з питання, підготовка до занять, написання наукової роботи, написання публікації, підготовка грантової пропозиції).

5. Пошук інформації (традиційні пошукові системи, спеціалізовані пошукові системи).

Шляхом реалізації поставленої задачі, зокрема через визначення критеріїв для опису ресурсів, мережа може бути доповнена зв'язками між компонентами даних, що містять системи наукової інформації та безпосередньо самими системами як джерелами наукової інформації.

Для реалізації поставленої задачі було розглянуто 20 інтернет-ресурсів, що містять наукову інформацію, серед яких:

1. Наукометричні ресурси (3).
2. Репозитарії наукових публікацій і текстів (3).
3. Ресурси наукових видань / видавництв наукової літератури (5).
4. Архіви препринтів (1).
5. Соціальна мережа для науковців (1).
6. Репозитарії даних наукових результатів (2).
7. Пошукові ресурси – провайдери доступу до ресурсів наукових та освітніх даних (5).

З огляду на ключові елементи, що характеризують систему, було виокремлено перелік компонентів, що є притаманними для систем, які містять наукову інформацію, і, відповідно, було проаналізовано ресурси для побудови структури та систематизації розглянутих ресурсів.

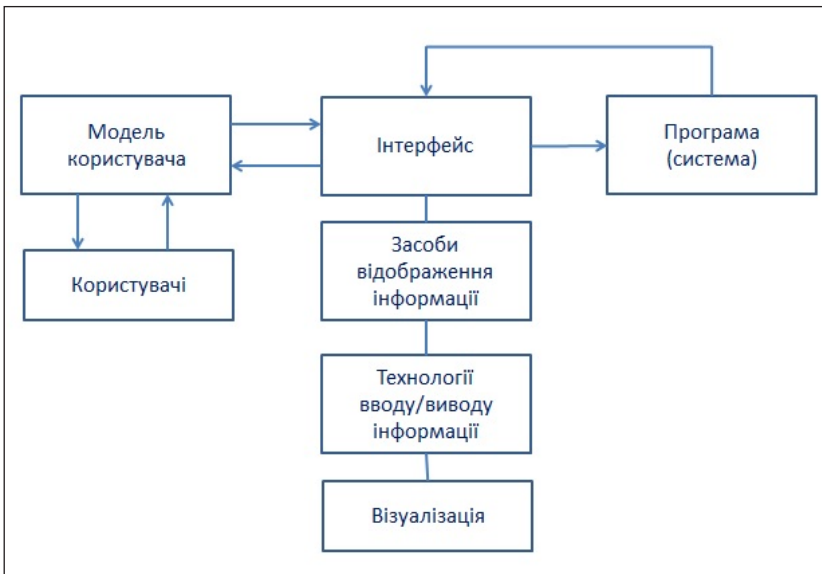


Рис. 2. Схема організації діалогу користувача з системою

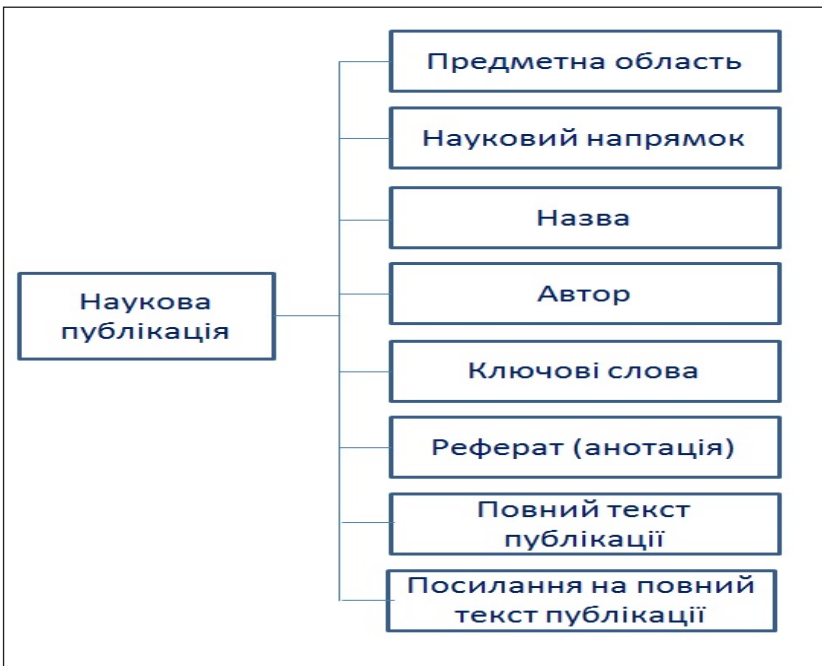


Рис. 3. Схематичне зображення компонентів, що характеризують наукову публікацію в рамках ресурсів наукової інформації

Схему компонентів було визначено з огляду на елементи, що характеризують наукову публікацію, із додаванням елемента повного тексту або посилання на повний текст, що є невіддільною частиною для ресурсів, що містять інформацію про наукову публікацію. Схему представлено на рисунку 3. Зазначені елементи є групою ознак, що дозволяють визначити варіанти наборів даних, що містить той чи інший ресурс.

Також під час формування переліку компонентів було враховано складові елементи інтер-

фейсу користувача (рис. 2), який є невіддільним елементом схеми організації діалогу з використанням моделі користувача та містить інформацію про способи вводу і виведення інформації, засоби її відображення та візуалізацію [18].

Для визначення способів представлення інформації, зокрема, в якому вигляді інформація може бути переглянута або завантажена на комп'ютер користувача, було розглянуто різні способи опрацювання інформації, представленої в мережі Інтернет. За результатами було виокремлено наступні способи представлення інформації на ресурсах наукової інформації:

1. Візуальна інформація, завантаження якої можливе тільки шляхом використання screen-shot;

2. Візуальна інформація, що може бути збережена у вигляді файлу зображення;

3. Посилання на сторінку, що містить візуальну інформацію;

4. Інформація міститься у файлі у зручному для подальшого використання форматі, посилання на скачування якого представлено на ресурсі.

Схему компонентів було визначено з огляду на елементи, що характеризують наукову публікацію, із додаванням елемента повного тексту або посилання на повний текст, що є невіддільною частиною для ресурсів, що містять інформацію про наукову публікацію. Схему представлено на рисунку 3. Зазначені елементи є групою ознак, що дозволяють визначити варіанти

наборів даних, що містить той чи інший ресурс.

З точки зору відкритості системи було визначено наступні характеристики, що визначають доступність інформації користувачеві:

1. Ресурс відкритого доступу, дані на якому повністю відкриті для перегляду та завантаження:

- доступ до ресурсу не передбачає реєстрацію користувача;

- доступ до ресурсу передбачає реєстрацію користувача.

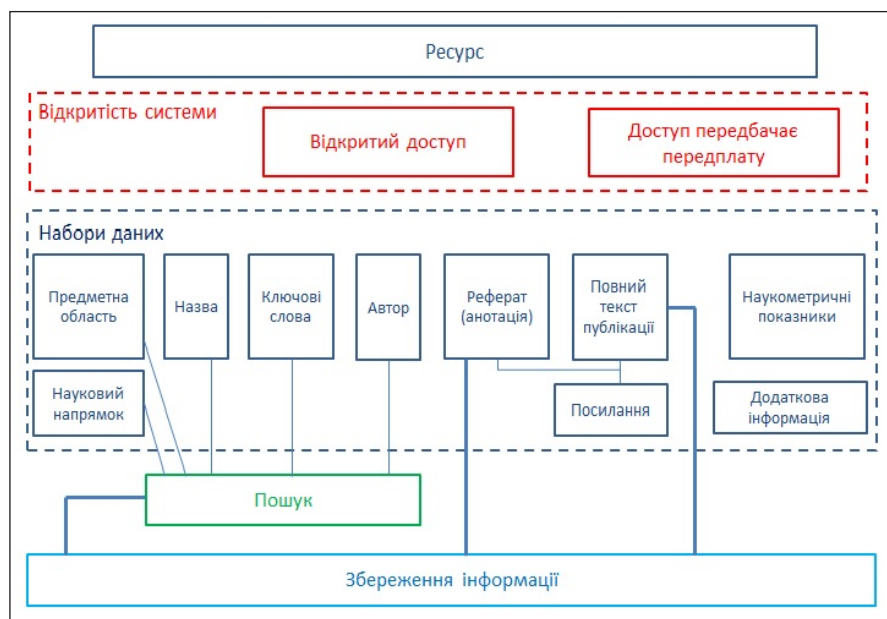


Рис. 4. Узагальнена модель для оцінки та систематизації ресурсів наукової інформації

2. На ресурсі частково представлена інформація про наукові дані відповідно до переліку компонентів, що характеризують публікацію.

3. Доступ до ресурсу передплатений.

Шляхом визначення основного переліку критеріїв, за якими можна провести аналіз ресурсів, було побудовано модель оцінки ресурсу доступу до наукової інформації (рис. 4).

**Висновки.** За результатами аналізу ресурсів, що містять наукову інформацію, було сформовано узагальнену таблицю (Додаток 1). Відповідно до запропонованих критеріїв, таблиця містить інформацію про опис системи, її відкритість, набори даних, що містить система, способи отримання та

збереження інформації.

Проведене дослідження дозволяє зрозуміти, які саме елементи масивів інформації притаманні певному виду ресурсів, а також визначити спільні риси даних систем та наборів даних, які можна отримати шляхом користування системами, для їх використання та подальшої обробки.

Проведена робота може виступати допоміжним інструментом для науковців під час пошуку наукової інформації: публікацій, тез доповідей, матеріалів конференцій, наукових даних, результатів наукових досліджень, інформації про наукові видання тощо.

Також проведений аналіз буде корисний для фахівців-розробників інформаційних систем в процесі формування вимог для побудови та розробки інформаційних систем наукової інформації. Проведене дослідження може бути розширене в контексті розгляду взаємодії «користувач-система» для формування дружнього інтерфейсу та системи, орієнтованої на пересічного користувача.

Проведене дослідження може бути розширене шляхом аналізу програмної побудови систем із визначенням ергономічності зазначених ресурсів, що своєю чергою сприятиме формуванню нових вимог до побудови систем наукової інформації та визначення політики приватності з огляду на спрямованість інформаційних он-лайн систем.

#### Список літератури:

1. Офіційний портал Європейської комісії, What does the General Data Protection Regulation Govern? URL: [https://ec.europa.eu/info/law/law-topic/data-protection/reform/what-does-general-data-protection-regulation-gdpr-govern\\_en](https://ec.europa.eu/info/law/law-topic/data-protection/reform/what-does-general-data-protection-regulation-gdpr-govern_en) (Дата звернення: 15.06.2018 року).
2. Twitter announces new privacy policy ahead of European data law. Jeremy B. White. URL: <https://www.independent.co.uk/life-style/gadgets-and-tech/news/twitter-privacy-policy-rules-update-personal-data-a8320666.html> (Дата звернення: 16.06.2018 року).
3. Google makes privacy policy clearer than ever to comply with EU law. Katie Collins. URL: <https://www.cnet.com/news/google-makes-privacy-policy-clearer-than-ever-to-comply-with-eu-gdpr-law/> (Дата звернення: 16.06.2018 року).
4. Положення про набори даних, які підлягають оприлюдненню у формі відкритих даних. URL: <https://www.kmu.gov.ua/ua/npas/248573101> (Дата звернення: 16.06.2018 року).
5. Open Access. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Open\\_access](https://en.wikipedia.org/wiki/Open_access) (Дата звернення: 16.06.2018 року).
6. H2020 Programme Guidelines to the Rules on Open Access to Scientific Publications and Open Access to Research Data in Horizon 2020. URL: [http://ec.europa.eu/research/participants/data/ref/h2020/grants\\_manual/hi/oa\\_pilot/h2020-hi-oa-pilot-guide\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/research/participants/data/ref/h2020/grants_manual/hi/oa_pilot/h2020-hi-oa-pilot-guide_en.pdf) (Дата звернення: 18.06.2018 року).

## Додаток 1

## Результати аналізу систем наукової інформації з урахуванням визначених критеріїв

№ п/п	Назва ресурсу, посилання	Спрямованість ресурсу	Відкритий доступ - OA/Передплата - S	Необхідність ресурсів на інформації	Предметна область	Науковий напрям	Назва публікації/експерименту/проєкту	Автор/автори	Ключові слова	Реферат/анотація	Повний текст публікації/опис наукових результатів, експерименту	Посилання на повний текст/опис наукових результатів, експерименту	Наукометричні показники	Пошук інформації на головній сторінці	Можливість збереження представленої інформації
1.	Web of Science <a href="http://www.webofknowledge.com/">www.webofknowledge.com/</a>	Наукометрична база даних	S	-	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	+
2.	Scopus <a href="http://www.scopus.com">www.scopus.com</a>	Наукометрична база даних	S	-	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	+
3.	Google Scholar <a href="https://scholar.google.com/mua/">https://scholar.google.com/mua/</a>	Наукометрична база даних	OA	-	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	-
4.	ArXiv <a href="https://arxiv.org/">https://arxiv.org/</a>	Архів препринтів	OA	-	+	+	+	+	-	+	+	+	-	+	-
5.	Zenodo <a href="https://zenodo.org/">https://zenodo.org/</a>	Архів публікацій	OA	-	-	+	+	+	+	+	-	-	-	+	+
6.	OpenAire <a href="http://www.openaire.eu">www.openaire.eu</a>	Інтегрований ресурс доступу до наукових результатів та публікацій	OA	-	-	+	+	+	-	-	+	+	-	-	-
7.	Springer <a href="http://www.springer.com">www.springer.com</a>	Видавництво наукової літератури	OA	-	-	+	+	+	-	+	+	+	-	+	-
8.	Elsevier <a href="http://www.elsevier.com">www.elsevier.com</a>	Видавництво наукової літератури	OA	-	-	-	+	-	-	+	-	-	-	+	-
9.	International Organization of Scientific Research <a href="http://iosjournals.org/">http://iosjournals.org/</a>	Видавництво наукових журналів	OA	-	-	+	-	-	-	-	-	-	+	-	-
10.	Scientific Research <a href="http://www.scirp.org">http://www.scirp.org</a>	Видавництво наукової літератури	OA	-	+	-	+	+	+	+	+	+	-	+	-
11.	Scientific Research An academic Publisher <a href="http://www.scirp.org">http://www.scirp.org</a>	Наукове видавництво	OA	-	+	+	+	+	-	+	+	+	-	+	+



7. Ontology-Based Technology for Development of Intelligent Scientific Internet Resources. Yury Zagorulko, Galina Zagorulko. URL: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-22689-7\\_17](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-22689-7_17) (Дата звернення: 11.06.2018 року).
8. Information resource studies as a new direction of scientific research: Formulation of the problem. T.F. Berestova. URL: <https://link.springer.com/article/10.3103/S0147688215030028> (Дата звернення: 11.06.2018 року).
9. Towards methods for systematic research on big data. Manirupa Das, Renhao Cui, David R. Campbell. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7363989/> (Дата звернення: 11.06.2018 року).
10. The construction of qualitative and quantitative data using discourse analysis as a research technique. Sebastian Sayago. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11135-014-0020-0> (Дата звернення: 11.06.2018 року).
11. Toward a systematized framework for resource efficiency indicators. SofieHuysman, SerenellaSala, LuciaMancini, FulvioArdente, Rodrigo A.F.Alvarenga, StevenDe Meester, FabriceMathieux, JoDewulf. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344914002328> (Дата звернення: 11.06.2018 року).
12. Creating a Data-Driven Global Society. Daniel J. Power. URL: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-11575-7\\_3](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-11575-7_3) (Дата звернення: 11.06.2018 року).
13. Formation and use of electronic information scientific and educational resources. Савченко З.В. URL: <http://lib.iitta.gov.ua/71/> (Дата звернення: 11.06.2018 року).
14. Технології організації знаньєвих ресурсів у бібліотечно-інформаційній діяльності. Лобузїна Катерина. URL: <http://eprints.rclis.org/25159/> (Дата звернення: 11.06.2018 року).
15. Особливості розробки критеріїв оцінювання електронних освітніх ресурсів. Литвинова Світлана. URL: <http://phm.kspu.kr.ua/ojs/index.php/NZ-PMFMTO/article/view/570> (Дата звернення: 11.06.2018 року).
16. Інформаційні ресурси держави: зміст та проблема захисту. Марущак А.І. URL: [http://ippi.org.ua/sites/default/files/09maizpz\\_0.pdf](http://ippi.org.ua/sites/default/files/09maizpz_0.pdf) (Дата звернення: 11.06.2018 року).
17. Поморова О.В. Проекування інтерфейсів користувача: навч. посіб. Хмельницький: ХНУ, 2011. 206 с.

#### **ПОДХОДЫ К ОПРЕДЕЛЕНИЮ КРИТЕРИЕВ ДЛЯ АНАЛИЗА ONLINE РЕСУРСОВ НАУЧНОЙ ИНФОРМАЦИИ**

*Статья посвящена описанию подходов к определению критериев для проведения анализа массива онлайн ресурсов научной информации для формирования общей картины информационных ресурсов доступа к научной информации и определения основных характеристик ресурсов с точки зрения открытости, наполнения и доступности информации. Предложено определение понятия систематизации ресурсов научной информации. Обозначены перспективы развития исследования для дальнейшего формирования требований к построению систем научной информации.*

**Ключевые слова:** научная информация, критерии анализа систем, пользователь научной информации.

#### **APPROACHES TO DEFINE THE CRITERIA FOR RESEARCH INFORMATION ONLINE RESOURCES ANALYSIS**

*Paper is dedicated to figuring out approaches to define the criteria for providing analysis of on-line resources of research information to from the general landscape of information resources of access to scientific information and defining the main characteristics of resources from the point of view of openness, content and availability. There represented the definition of the systematization of the research information resources and described the perspectives of the research progress for further forming of requirements for development of research information systems.*

**Key words:** research information, systems' analysis criteria, user of research information.

**Бабаков Р.М.**

Донецкий национальный университет имени Василия Стуса (г. Винница)

## СИНТЕЗ ЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ МИКРОПРОГРАММНОГО АВТОМАТА С ОПЕРАЦИОННЫМ АВТОМАТОМ ПЕРЕХОДОВ

*В статье рассматриваются основные этапы синтеза логической схемы микропрограммного автомата с операционным автоматом переходов. Исходными данными для синтеза схемы выступает формальное решение задачи алгебраического синтеза автомата. В общем случае формальное решение определяет множества состояний и их кодов, множества операций переходов и их кодов, а также множество переходов, реализуемых каноническим способом. На примере автомата Мура рассмотрены последовательность и суть отдельных этапов синтеза его логической схемы.*

**Ключевые слова:** микропрограммный автомат, операционный автомат переходов, алгебраический синтез, логическая схема, граф-схема алгоритма.

**Постановка проблемы.** Микропрограммный автомат (МПА) является одним из типов устройства управления, функцией которого является координация совместной работы всех блоков вычислительной системы [1, с. 426; 2, с. 114]. По сравнению с другими типами устройств управления схема МПА характеризуется максимально возможным быстродействием и аппаратурными затратами [2, с. 168]. Рост сложности вычислительных систем делает актуальной задачу снижения их стоимости, что возможно, в числе прочего, за счет оптимизации аппаратурных затрат в логической схеме МПА [2, с. 178].

Одним из путей снижения аппаратурных затрат в логической схеме микропрограммного автомата является разработка новых структур МПА и методов их синтеза. Одной из таких структур является микропрограммный автомат с операционным автоматом переходов (МПА с ОАП), в котором функция переходов представляется в виде множества частичных функций [3, с. 23; 4, с. 22]. Преимуществом данной структуры является снижение аппаратурных затрат в схеме формирования автоматных переходов по сравнению с канонической реализацией МПА [5, с. 205].

**Анализ последних исследований и публикаций.** Анализом синтеза логической схемы микропрограммного автомата с операционным автоматом переходов занимались такие ученые, как В.М. Глушков, С.И. Баранов, А.А. Баркалов, И.В. Ярош и другие. Но особого внимания в данной области заслуживают работы ученого Р.М. Бабакова «Алгебраический синтез микропрограммного автомата с операционным автоматом переходов» и «Формальное решение задачи алгебраического синтеза микропрограммного

автомата с операционным автоматом переходов ученого», на которые мы и будем ссылаться в нашей статье.

**Постановка задачи.** В работе Р.М. Бабакова «Алгебраический синтез микропрограммного автомата с операционным автоматом переходов» [6, с. 37] выполнена постановка задачи алгебраического синтеза МПА с ОАП, формальным решением которой является система изоморфизмов алгебр переходов и выходов. В работе того же автора «Формальное решение задачи алгебраического синтеза микропрограммного автомата с операционным автоматом переходов» [7, с. 103] приведен пример формального решения задачи алгебраического синтеза для МПА, заданного граф-схемой алгоритма (ГСА, [2, с. 116]). В общем случае в результате алгебраического синтеза можно считать известными следующие характеристики МПА с ОАП:

- множество состояний  $A = \{a_1, \dots, a_M\}$ , где  $M$  – число состояний;
- множество структурных (двоичных) кодов состояний  $K_s(a_i)$ ,  $a_i \in A$ ;
- множество операций переходов  $O = \{O_1, \dots, O_{N_i}\}$ , где  $N_i$  – количество промежуточных алгебр переходов;
- множество переходов автомата, реализуемых каноническим способом (по системе булевых уравнений) [2, с. 129; 7, с. 104].

Согласно исследования Р.М. Бабакова, структурный синтез МПА с ОАП включает два этапа: алгебраический синтез и синтез логической схемы автомата. Первому этапу посвящены две первые работы «Алгебраический синтез микропрограммного автомата с операционным автоматом переходов» и «Формальное решение задачи



Операционная таблица переходов

$a_m$	$Ks(a_m)$	$a_s$	$Ks(a_s)$	$X_h$	$O_h$	$z_h$	$h$
$a_0$	110	$a_1$	000	1	–	$z_1$	1
$a_1$	000	$a_2$	101	$\bar{x}_1$	$O_1$	–	2
		$a_3$	100	$X_h$	$O_2$	$z_2$	3
$a_2$	101	$a_5$	010	1	$O_1$	–	4
$a_3$	100	$a_4$	001	1	$O_1$	–	5
$a_4$	001	$a_2$	101	$X_1$	$O_2$	$z_2$	6
		$a_0$	110	$\bar{x}_1$	$O_1$	–	7
$a_5$	010	$a_6$	111	1	$O_1$	–	8
$a_6$	111	$a_7$	011	1	$O_2$	$z_2$	9
$a_7$	011	$a_2$	000	1	$O_1$	–	10

алгебраического синтеза микропрограммного автомата с операционным автоматом переходов ученого», а второй этап к настоящему моменту остается неисследованным [6; 7]. Данная работа посвящена вопросу синтеза логической схемы МПА с ОАП на основе результатов алгебраического синтеза.

**Изложение основного материала исследования.** Согласно исследованиям А.А. Баркалова и Р.М. Бабакова [3, с. 24], структура МПА с ОАП включает следующие блоки:

- операционная часть;
- схема формирования кодов операций переходов (Z-подсхема);
- регистр памяти;
- схема формирования микроопераций.

Рассмотрим синтез данных блоков на примере решения задачи алгебраического синтеза, полученного в работе Р.М. Бабакова «Формальное решение задачи алгебраического синтеза микропрограммного автомата с операционным автоматом переходов» [7, с. 105].

*Операционная часть.*

В общем случае данный блок содержит все комбинационные схемы используемых операций переходов, а также комбинационную схему, реализующую часть переходов каноническим способом. Каждая КС формирует частичную структурную функцию переходов  $d_i$ , значение которой поступает в мультиплексор результата. Для построения мультиплексора результата все функции  $d_i$  необходимо закодировать двоичным кодом  $K(d_i)$  разрядности  $R_z = \lceil \log_2 N_d \rceil$ .

Например, комбинационная схема операции  $O_1$ , формирующая функцию  $d_1$ , представляет собой трехразрядный сумматор, на одно плечо

которого подается код текущего состояния  $T$ , на второе – двоичная константа 101, соответствующая значению 5 в промежуточной алгебре  $G_{I_1}$ .

Комбинационная схема операции  $O_2$ , формирующая функцию  $d_2$ , состоит из трехразрядного элемента «исключающее ИЛИ», выполняющего поразрядно данную операцию между кодом текущего состояния  $T$  и двоичной константой 100.

Для синтеза комбинационной схемы, реализующей подмножество автоматных переходов каноническим способом, необходимо придерживаться канонического подхода, включающего следующие этапы [2, с. 181]:

- составление структурной таблицы переходов;
- формирование и минимизация системы булевых функций переходов;
- синтез комбинационной схемы, выход которой соответствует частичной структурной функции переходов  $d_3$ .

Подчеркнем, что данные действия выполняются лишь для того подмножества переходов, которые, согласно результатам алгебраического синтеза, решено реализовывать каноническим способом.

В рассматриваемом примере каноническим способом реализуется единственный переход  $a_0 \rightarrow a_1$ . Поскольку такой переход один, комбинационная схема функции  $d_3$  является формирователем константы, равной структурному коду состояния перехода  $K_s(a_1) = 000$ .

Закодируем функции  $d_1-d_3$  двухразрядным двоичным кодом  $\langle z_1 z_2 \rangle$ . Пусть  $K(d_1) = 00$ ,  $K(d_2) = 01$ ,  $K(d_3) = 10$ . Данные коды являются кодами операций переходов и влияют на организацию мультиплексора результата.

На рис. 1 показана функциональная схема операционной части для рассматриваемого примера.

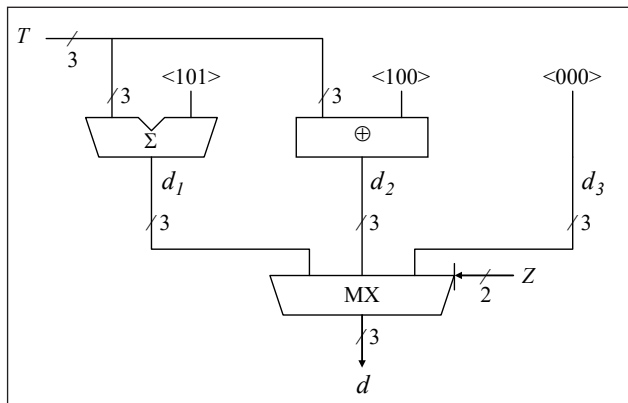


Рис. 1. Функціональна схема операційної частини

Схема формування кодів операцій переходів (Z-підсхема).

Даний блок може бути реалізований або в базисі логічних елементів, або в базисі запам'ятовуючих пристроїв (ЗУ) – ПЗУ, ППЗУ, блокова пам'ять ПЛИС типу FPGA. Незалежно від елементного базису, синтез Z-підсхеми проводиться по операційній таблиці переходів (табл. 1).

Таблиця в цілому подібна класическій таблиці переходів [2, с. 182] і містить наступні стовпці:

- $a_m$  – код поточного стану автомата;
- $K_s(a_m)$  – структурний (двоичний) код поточного стану;
- $a_s$  – код стану переходу;
- $K_s(a_s)$  – структурний (двоичний) код стану переходу;
- $X_h$  – умова переходу;
- $O_h$  – операція переходу (прочерк означає реалізацію переходу канонічним способом);
- $z_h$  – код операції переходу, формований Z-підсхемою (прочерк означає нульові значення змінних  $z_1$  і  $z_2$ , присутність змінної – її одиничне значення);
- $h$  – номер переходу.

Представляючи код  $T$  поточного стану двоичними змінними  $T_1-T_3$ , можна записати наступні рівняння для функцій  $z_1$  і  $z_2$  (в формі ДНФ):

$$z_1 = T_1 T_2 \bar{T}_3;$$

$$z_2 = \bar{T}_1 \bar{T}_2 \bar{T}_3 \bar{x}_1 \vee \bar{T}_1 \bar{T}_2 T_3 \bar{x}_1 \vee T_1 T_2 T_3.$$

Комбінаційна схема, реалізуюча приведені рівняння, будується тривіально в будь-якому елементному базисі.

Реалізація Z-підсхеми в базисі ЗУ цілесообразна зазвичай при невеликій кількості структурних входних сигналів. В розглянутому прикладі єдиним входним структурним сигналом є  $x_1$ , що, разом з змінними  $T_1-T_3$ , визначає для ЗУ Z-підсхеми 16 адресів пам'яті. Таблиця ЗУ Z-підсхеми представлена в табл. 2.

Таблиця 2

Содержимое ЗУ Z-подсхемы

$T_1 T_2 T_3 x_1$	$z_1 z_2$	$T_1 T_2 T_3 x_1$	$z_1 z_2$
0 0 0 0	0 1	1 0 0 0	0 0
0 0 0 1	0 0	1 0 0 1	0 0
0 0 1 0	0 0	1 0 1 0	0 0
0 0 1 1	0 1	1 0 1 1	0 0
0 1 0 0	0 0	1 1 0 0	1 0
0 1 0 1	0 0	1 1 0 1	1 0
0 1 1 0	0 0	1 1 1 0	0 1
0 1 1 1	0 0	1 1 1 1	0 1

Регістр пам'яті.

В якості регістра пам'яті може бути вибрано стандартний регістр потрібної розрядності, організований на базі тригерів D-типу. В цьому випадку окремий синтез регістра пам'яті не потрібен.

Схема формування мікрооперацій.

Розглянувана структура МПА з ОАП допускає різні способи реалізації схеми формування мікрооперацій. Зазвичай цілесообразною є канонічна реалізація схеми СФМО по системі булевих рівнянь [2, с. 90].

**Висновки.** Після того, як в результаті алгебраїчного синтезу мікропрограмного автомата з операційним автоматом переходів сформовані всі елементи системи ізоморфізмів алгебр автомата [6, с. 36], синтез його логічної схеми зводиться до послідовного синтезу окремих структурних блоків. При цьому не можна виключати можливості додаткової оптимізації окремих блоків з урахуванням використовуваного елементного базису і різних схемотехнічних рішень, що не впливають на результати алгебраїчного синтезу. Наприклад, до операційної частини можуть застосовуватися відомі методи синтезу операційних автоматів, що допускають різні варіанти його архітектурної реалізації [8, с. 36]. Розв'язання цих питань не є очевидним і потребує проведення окремих досліджень.

Список літератури:

1. Глушков В.М. Синтез цифрових автоматів. Москва: Физматгиз, 1962. 476 с.
2. Баранов С.И. Синтез мікропрограмних автоматів. Ленінград: Енергія, 1979. 232 с.
3. Баркалов А.А., Бабаков Р.М. Операційне формування кодів станів в мікропрограмних автоматах. Кибернетика і системний аналіз. 2011. №2. С. 21–26.

4. Баркалов А.А., Бабаков Р.М. Алгебраическая интерпретация микропрограммного автомата с операционным автоматом переходов. Кибернетика и системный анализ. 2016. № 2. С. 22–29.
5. Babakov R, Barkalov A., Titarenko L. Research of Efficiency of Microprogram Final-State Machine with Datapath of Transitions. Proceedings of 14th International Conference "The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM). February 21–25, 2017. Polyana, Ukraine. P. 203–206.
6. Бабаков Р.М. Алгебраический синтез микропрограммного автомата с операционным автоматом переходов. Информационные технологии и компьютерная инженерия. 2017. № 39, Т. 2. С. 35–41.
7. Бабаков Р.М. Формальное решение задачи алгебраического синтеза микропрограммного автомата с операционным автоматом переходов. Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. 2018. № 2, Том 29 (68). С. 103–107.
8. Бабаков Р.М., Ярош И.В. Операционный автомат переходов. Сборник научных трудов Донецкого национального технического университета. Серия «Вычислительная техника и автоматизация». 2015. № 1 (28). С. 33–40.

### СИНТЕЗ ЛОГІЧНОЇ СХЕМИ МІКРОПРОГРАМНОГО АВТОМАТА З ОПЕРАЦІЙНИМ АВТОМАТОМ ПЕРЕХОДІВ

*У статті розглядаються основні етапи синтезу логічної схеми мікропрограмного автомата з операційним автоматом переходів. Вхідними даними для синтезу схеми виступає формальний розв'язок задачі алгебраїчного синтезу автомата. У загальному випадку формальний розв'язок визначає множини станів та їх кодів, множини операцій переходів та їх кодів, а також множини переходів, реалізованих у канонічний спосіб. На прикладі автомата Мура розглянуті послідовність і суть окремих етапів синтезу його логічної схеми.*

**Ключові слова:** мікропрограмний автомат, операційний автомат переходів, алгебраїчний синтез, логічна схема, граф-схема алгоритму.

### SYNTHESIS OF THE LOGICAL CIRCUIT OF THE MICROPROGRAMMABLE FINITE-STATE MACHINE WITH DATAPATH OF TRANSITIONS

*In the article the main stages of synthesizing of the logical circuit of a microprogrammable finite-state machine with datapath of transitions are considered. The initial data for the circuit synthesis is a formal solution of the problem of algebraic synthesis of the finite-state machine. In the general case, the formal solution determines the sets of states and their codes, the sets of transition operations and their codes, and also the set of transitions realized by the canonical method. On the example of Moore's finite-state machine, the sequence and essence of individual stages of the synthesis of its logic circuit are considered.*

**Key words:** microprogram finite-state machine, datapath of transitions, algebraic synthesis, logic circuit, flow-chart.

**Біряк В.В.**

Одеський національний політехнічний університет

## РОЗРАХУНОК ДИНАМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТРУБОПРОВОДУ ВІД ПНТ-4 ДО ПНТ-3 ПО ВИТРАТІ КОНДЕНСАТУ В ГРУПІ ПІДГРІВАЧІВ НИЗЬКОГО ТИСКУ ЕНЕРГОБЛОКУ 1000 МВт ЗАПОРІЗЬКОЇ АЕС

*Об'єктом проектування є технологічна ділянка групи ПНТ, що входить у другий контур енергоблоку АЕС. Розрахунок динамічних властивостей трубопроводу від ПНТ-4 до ПНТ-3 по витраті конденсату в групі підігрівачів низького тиску енергоблоку 1000 МВт Запорізької АЕС. У тепловій схемі атомної електростанції з реактором типу ВВЕР-1000 застосовується система регенерації низького тиску. Ця система призначена для підігріву основного конденсату, що подається конденсаційними насосами з головного конденсатора в деаератори. Застосування ПНТ підвищує ККД установки і суттєво впливає на безпеку і надійність АЕС.*

**Ключові слова:** автоматична система регулювання, АЕС, підігрівач низького тиску, ВВЕР-1000, динамічні властивості трубопроводу.

**Вступ.** У тепловій схемі атомної електростанції з реактором типу ВВЕР-1000 застосовується система регенерації низького тиску. Ця система призначена для підігріву основного конденсату, що подається конденсаційними насосами з головного конденсатора в деаератори. Застосування ПНТ підвищує ККД установки і суттєво впливає на безпеку і надійність АЕС.

Підігрів основного конденсату в ПНТ здійснюється через поверхню трубної системи.

Для запобігання аварійних ситуацій на АЕС необхідно регулювати рівень конденсату, який подається в ПНТ, і в даному проекті розроблена система управління з використанням датчиків, виконавчих механізмів і регулятора.

Регульованим параметром в групі ПНТ є рівень конденсату (дренажу), який утворюється в результаті нагрівання основного конденсату. Підвищення або зниження рівня дренажу може привести до аварії на атомній електростанції. Рівень конденсату гріючої пари є важливим складником процесу управління, оскільки пар на нагрів береться з не контрольованих відборів проточної частини турбіни. Тому метою даного проекту є розрахунок динамічних властивостей трубопроводу від ПНТ-4 до ПНТ-3 по витраті конденсату.

**Опис об'єкта автоматизації.** В реакторній установці використовуються регенеративні підігрівачі поверхневого типу, тобто такі, в яких гріюче середовище (пар відбору турбіни) відокремлене від нагриваючого (вода конденсатно-живильного тракту). Пар конденсується в підігрівачі низького тиску (ПНТ) та у вигляді води (так званий дренаж) відводиться на попередній

по ходу ПНТ. З першого після конденсатора підігрівача (ПНТ) дренаж зливається в конденсатор. Така схема отримала назву каскадний злив дренажів.

За каскадного зливу дренажів повинен бути забезпечений відвід тільки конденсату. Не сконденсований в підігрівачі пар може по дренажному трубопроводу надходити в попередній підігрівач. Рівень конденсату в підігрівачах також повинен бути визначеним. Оскільки регенеративний підігрів води в тракці здійснюється шляхом конденсації пари на стінках труб, то при підвищенні рівня конденсату частина поверхні, залита водою, не бере участі в теплообміні і виключається можливість підігріву води до певного рівня, що визначається оптимальною розбивкою підігріву по ступеням.

Поверхневі регенеративні підігрівачі виконані вертикальними. Вертикальні підігрівачі найбільш зручні під час компонування обладнання в машинному залі. Крім того, конденсуюча пара утворює плівку на теплообмінній поверхні і якщо вона вертикальна, то полегшується відведення плівки конденсату, що підвищує коефіцієнт теплопередачі і зменшує теплообмінну поверхню.

Для конденсатного тракту, тобто для ПНТ, характерні відносно низькі температури, коли корозійні процеси протікають досить інтенсивно.

Крім того, в конденсаті, що підігривається, містяться корозійно-агресивні гази – кисень і вуглекислота, що сприяють посиленню корозійних процесів. З цих причин матеріал поверхні теплообміну ПНТ повинен виготовлятися з корозійностійких аустенітних нержавіючих сталей, високо-

нікелевих сплавів. Конструкція і принцип дії. Підігрівач низького тиску являє собою вертикальний кожухотрубний теплообмінник з гладкими прямими трубками поверхні теплообміну. Число ходів основного конденсату – чотири, це означає, що під час руху основний конденсат проходить по висоті підігрівача чотири рази. Пройшовши по частині трубок вниз, він розвертається і йде за іншими трубками вгору і так далі. Основними вузлами підігрівача є:

- корпус, що складається з основної обичайки і приварених до неї зовнішнього кожуха днища з опорою. На верхньому торці обичайки мається приварний фланець, у верхній частині обичайки (під кожухом) є ряд отворів великого діаметру для проходу гріє пара до трубної системи. За розташування патрубків підведення в нижній частині зовнішнього корпусу, така конструкція є більш надійною від закидання води в турбіну під час розриву трубок в ПНТ. Матеріал корпусу сталь 12X18H10T;

- виймальна частина, що складається з трубної системи з нижньою водяною камерою, проміжної обичайки і верхньої водяною камери;

- трубна система, що складається з пучка прямих труб Ø16x1 развальцованих і обварених в двох трубних дошках. Додаткове кріплення трубок в пучку здійснюється за допомогою перегородок типу диск-кілець, які служать також для організації руху парового потоку в міжтрубному просторі. Нижня водяна камера являє собою еліптичне днище з ввареною в нього (по діагоналі) перегородкою. Проміжна обичайка своїм нижнім фланцем кріпиться до фланця основної обичайки корпусу. До верхнього фланця проміжної обичайки кріпиться фланець верхньої водяної камери;

- верхня водяна камера складається із зварених між собою днища і обичайки. Для напряму руху потоку основного конденсату по ходам трубного пучка в камері закріплена Т-образна перегородка. Для підвищення герметичності фланцеві з'єднання зварюються. Зварений шов малого катета накладається на спеціальні елементи-губки, які є частиною кожного фланця.

Під час проведення ремонтних робіт, пов'язаних із зняттям водяних камер або трубної системи, зварений шов видаляється, а під час складання накладається знову. Після декількох подібних операцій замість губок, зрізаних разом зі швами, до фланців приварюються металеві прокладки-мембрани, за якими в подальшому проводиться заварка фланцевого роз'єму. Матеріал виймальної частини – сталь 09X18H10T.

ПНТ призначений для підігріву основного конденсату паром, який надходить з відбору турбіни. Дренаж гріючого пара відводиться самопливом в паровий простір попереднього ПНТ або подається за допомогою насоса в основну лінію. Величина підігріву визначається параметрами пара з нерегульованих відборів. Єдиною регульованою величиною є рівень дренажу.

За підвищення рівня затоплюються поверхні теплообміну. В процесі аварійного розвантаження енергоблока тиск пара різко зменшується, що призводить до закипання дренажу і можливості попадання його в турбіну. За низького рівня конденсату можливе проскакування пара в нижчий підігрівач, що зменшує ККД або в дренажний насос, що приводить до кавітації.

Динамічні властивості ПНТ описуються рівнянням інтегруючої ланки. З цієї причини для регулювання рівня використовують П-закон регулювання. Для поліпшення процесу регулювання в ПНТ між регулятором встановлюють пристрої динамічного зв'язку. Властивості динамічної ланки визначаються умовою інваріантності. Схема регулювання представлена на рисунку 1.

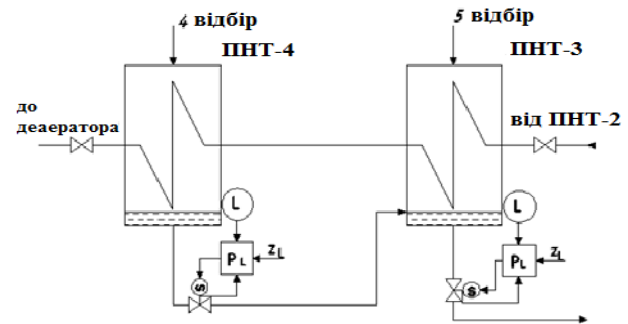


Рис. 1. Схема регулювання рівня в групі ПНТ

Розрахунок динамічних властивостей трубопроводу від ПНТ-4 до ПНТ-3 по витраті конденсату. Втрати тиску по довжині трубопроводу (без теплообмінників)

$$\Delta P_L = \left( \frac{\lambda L}{D_{вн}} + \sum_{i=1}^n \zeta_i \right) \frac{\rho \omega^2}{2} \quad (1)$$

де,  $\lambda$  – коефіцієнт тертя (Дарсі);  $\zeta_i$  - коефіцієнт місцевих опорів;  $D_{вн}$  – внутрішній діаметр трубопроводу;  $\omega$  – швидкість рідини;  $\rho$  – щільність рідини.

Якщо в (1) виразити швидкість через масову витрату  $M$ , то

$$\Delta P_L = \left( \frac{\lambda L}{D_{вн}} + \sum_{i=1}^n \zeta_i \right) \frac{M^2}{2\rho S_{тр}^2} \quad (2)$$

де,  $S_{тр}$  – площа поперечного перерізу трубопроводу.

Або

$$\Delta P_{\text{л}} = K_{\text{л}} M^2 \quad (3)$$

$$= \left( \frac{\lambda L}{D_{\text{вн}}} + \sum_{i=1}^n \zeta_i \right) \frac{1}{2 \rho S_{\text{тр}}^2} \quad (4)$$

$$K_{\text{л}} = \left( \frac{0,032 \cdot 5}{0,2} + (1 + 0,5 + 1 + 1 + 2) \right) \cdot \frac{1}{2 \cdot 982,6 \cdot 0,031^2} = 3,33 \frac{1}{\text{кгм}}$$

Коефіцієнт тертя  $\lambda$  можна визначити за формулою А.Д. Альтшуля:

$$\lambda = 0,11 \left( \frac{K_{\text{э}}}{D_{\text{вн}}} + \frac{68}{\text{Re}} \right)^{0,25} \quad (5)$$

$$\lambda = 0,11 \left( \frac{0,5}{200} + \frac{68}{15319,15} \right)^{0,25} = 0,032$$

де, еквівалентна шорсткість  $K_{\text{э}}$  знаходиться в діапазоні 0,01-0,7 мм (для труб нових і заржавілих відповідно). В цьому разі величину  $D_{\text{вн}}$  (3.5) слід виразити в міліметрах.

Число Рейнольдса

$$\text{Re} = \frac{\dot{E} D_{\text{вн}}}{A} \quad (6)$$

$$\text{Re} = \frac{1,8 \cdot 0,2}{0,0000235} = 15319,15$$

де, швидкість  $\omega$  виражається в м/с, кінематична в'язкість в м<sup>2</sup>/с, динамічна в'язкість  $\mu$  в кгс\*с/м<sup>2</sup>, масова витрата  $M$  в кг/год, внутрішній діаметр в мм. У втрати тиску в трубопроводі, розраховані по (1) або (2), не входять втрати в регенеративних підігрівачах, тому

$$\Delta P_{\text{л}}^{\Sigma} = \Delta P_{\text{л}} \quad (7)$$

Тоді коефіцієнт для трубопроводу, що розраховується, відповідно до (3)

$$\Delta P_{\text{л}}^{\Sigma} = \Delta K_{\text{л}} \cdot M^2 \quad (8)$$

$$\Delta P_{\text{л}}^{\Sigma} = 3,33 \cdot 55,34^2 = 10198,18 \frac{\text{кг}}{\text{мс}^2} = 0,01019 \text{ МПа}$$

Розглянемо наближений вибір РК, придатний для цілей даного завдання, оскільки точний конструктивний розрахунок РК не є метою даної роботи.

Перепад тиску в системі на вході і виході трубопроводу

$$\Delta P_{\text{с}} = P_{\text{а}} - P_{\text{е}} \quad (9)$$

$$\Delta P_{\text{с}} = 0,541 - 0,287 = 0,25 \text{ МПа}$$

де,  $\Delta P_{\text{z}} = z \rho g$  втрата тиску внаслідок різниці висот початкової та кінцевої відміток конденсатору.

У цій схемі трубопроводу знак «-». Тоді необхідний перепад тиску на регулюючому клапані  $\Delta P_{\text{рк}}^{\text{мп}}$  за максимальної витрати з урахуванням розрахованих втрат в лінії

$$\Delta P_{\text{рк}}^{\text{тр}} = \Delta P_{\text{с}} - \Delta P_{\text{л}} \quad (10)$$

$$\Delta P_{\text{рк}}^{\text{тр}} = 0,25 - 0,0101 = 0,239 \text{ МПа}$$

Тип РК вибирається залежно від тиску і температури середовища, перепад тиску на клапані за його повного відкриття та інших властивостей і вимог. У таблиці 1 наведені основні типи РК, що використовуються на АЕС за різних умовних тисках  $P_{\text{у}}$  середовища.

Таблиця 1

Тиск в різних регулюючих клапанах

$P_{\text{у}}$ , МПа	Тип РК
$\leq 2,5$	Поворотно-золотниковий кутовий;
4,0; 6,4; 10,0	Голчастий прохідний, поворотно-золотниковий, прохідний;
20,0 и более	Голчастий кутовий, шиберний

Коефіцієнт пропускної здатності клапана, м<sup>3</sup>/год (11)

де,  $M$  – витрата середовища, кг/год;  $\Delta P_{\text{рк1л}}$  – перепад тиску на клапані за повного відкриття, МПа;  $\rho$  – щільність середовища кг/м<sup>3</sup>.

Значення  $K_{\text{v}}$  чисельно дорівнює витраті м<sup>3</sup>/год несжимаємої рідини з щільністю 1000 кг/м<sup>3</sup>, що проходить через РК за перепаду тиску на ньому 0,098 МПа.

$$K_{\text{v}} = 0,99 \cdot 10^{-2} \frac{199224}{\sqrt{0,098 \cdot 1000}} = 199,22$$

Залежно від розрахованого  $K_{\text{v}}$  визначають діаметр умовного проходу клапана  $D_{\text{у}}$ .

Розраховують площу  $S_{\text{у}}$ , м<sup>2</sup>, вхідного патрубка РК

$$S_{\text{у}} = \frac{\pi D_{\text{у}}^2}{4} \cdot 10^{-4} \quad (12)$$

Потім розраховують площу регульованого прохідного перерізу РК за повного його відкриття

$$S_{\text{рк1}} = 10^{-4} \frac{K_{\text{v}}}{5,04 \mu} \quad (13)$$

$$S_{\text{рк1}} = \frac{199,22}{5,04 \cdot 0,6} \cdot 10^{-4} = 0,066 \text{ м}^2$$

де,  $\alpha$  – коефіцієнт витрати клапана обраного типу за повного відкриття.

Коефіцієнт витрати  $\mu$  при повному відкритті має наступні значення:

- шиберні клапани 0,7 или 0,8;
- поворотно-золотникові 0,6;
- голчасті прохідні 0,6.

Отримане значення  $S_{\text{рк1}}$  використовується для розрахунку коефіцієнтів:

$$K_{\text{рк}} = \frac{1}{\mu^2 2 \rho} = \frac{\zeta_{\text{рк}}}{2 \rho} \quad (14)$$

$$K_{\text{рк}} = \frac{1}{\mu^2 2 \rho} = \frac{1}{0,6^2 \cdot 2 \cdot 982,6} = 0,0014 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$$

$$\alpha_{\text{рк}} = \left( \frac{\delta \Delta P}{\delta M} \right) = \frac{2K_{\text{рк}} \bar{M}}{S_{\text{рк}}^2}; \quad (15)$$

$$a_{\text{рк}} = \left( \frac{\partial \Delta P}{\partial H} \right) = \frac{2K_{\text{рк}} M}{S_{\text{рк}}^2} = \frac{2 * 0,0014 * 55,34}{0,066^2} = 35,57$$

$$b_{\text{рк}} = \frac{2K_{\text{рк}} M^2}{S_{\text{рк}}^3} = \frac{2 * 0,0014 * 55,34^2}{0,066^3} = 29826,65 \quad (16)$$

$$b_{\text{рк}} = \frac{2K_{\text{рк}} * M^2}{S_{\text{рк}}^3} = \frac{2 * 0,0014 * 55,34^2}{0,066^3} = 29826,65$$

$$\alpha_{\text{л}} = 2K_{\text{л}} \bar{M} \quad (17)$$

$$a_{\text{л}} = 2 * 3,33 * 55,34 = 368,56$$

Постійна часу трубопроводу

$$T = \frac{K_y}{\alpha_{\text{л}} + \alpha_{\text{рк}}}, \quad (18)$$

$$T = \frac{161,29}{404,13} = 0,4 \text{ с}$$

$$K_y = \frac{L}{S_{\text{мп}}} \quad (19)$$

$$K_y = \frac{5}{0,031} = 161,29 \frac{1}{\text{м}}$$

Коефіцієнт передачі по каналу «площа прохідного перерізу клапана-витрата»

$$K_{S_{\text{рк}}-M} = \frac{b_{\text{рк}}}{\alpha_{\text{л}} + \alpha_{\text{рк}}} \quad (20)$$

$$K_{S_{\text{рк}}-M} = \frac{29826,65}{404,13} = 73,8$$

Результати. Виведення рівняння буде здійснюватися для ПНТ з регулюючим органом на стоці, який зображений на рисунку 2.

Скористаємося рівнянням динаміки

$$F_3 \rho \frac{dL}{dt} = \Delta M_{\text{п}} - \Delta M_{\text{к}} \quad (21)$$

Для розглянутого випадку витрата конденсату через зливний регулюючий клапан визначається прохідним перерізом клапана  $S_{\text{кл}}$  і перепадом тиску на ньому  $\Delta P_{\text{кл}}$ , а саме:

$$M_{\text{к}} = \mu S_{\text{кл}} \sqrt{2\rho \Delta P_{\text{кл}}}, \quad (22)$$

де,  $\mu$  - коефіцієнт витрати клапана;  $\rho$  - щільність конденсату.

$$\text{Таким чином, } M_{\text{к}} = \mu S_{\text{кл}} \sqrt{2\rho \Delta P_{\text{кл}}},$$

Своєю чергою перепад тиску на клапані  $\Delta P_{\text{кл}}$  визначається;

$$\begin{aligned} & - \text{для вільного зливу конденсату} \\ & - \Delta P_{\text{кл}} = L\rho g \end{aligned} \quad (23)$$

де,  $L$  - рівень конденсату;  
- для підігрівача під тиском

$$\Delta P_{\text{кл}} = L\rho g + \Delta P, \quad (24)$$

де,  $\Delta P$  - різниця тисків, під якими знаходиться теплообмінник.

Прийнявши для розгляду даний випадок, підставимо (24) в (22)

$$M_{\text{к}} = \mu S_{\text{кл}} \sqrt{2\rho(L\rho g + \Delta P)} \quad (25)$$

Отримана функція є нелінійною. Для отримання приросту функції  $M_{\text{к}} = f(S_{\text{кл}}, \Delta P_{\text{кл}})$  скористаємося розкладанням функції в ряд Тейлора, залишаючи тільки лінійні члени.

$$\Delta M_{\text{к}} = \left( \frac{\delta M_{\text{к}}}{\delta S_{\text{кл}}} \right) \Delta S_{\text{кл}} + \left( \frac{\delta M_{\text{к}}}{\delta \Delta P_{\text{кл}}} \right) \Delta P_{\text{кл}} \quad (3.26)$$

З урахуванням цих умов одержуємо:

$$\begin{aligned} & \frac{F_3 \cdot \sqrt{2\rho \cdot (\rho g L + \Delta P)}}{\mu \rho g S_{\text{кл}}} \cdot \frac{dL}{dt} + \Delta L = \\ & = \frac{\sqrt{2\rho \cdot (\rho g L + \Delta P)}}{\mu \rho^2 g S_{\text{кл}}} \cdot \Delta M - \frac{2 \cdot (L\rho g + \Delta P)}{\rho g S_{\text{кл}}} \cdot \Delta S_{\text{кл}} \\ & \frac{F_3 \cdot \sqrt{2\rho \cdot (\rho g L + \Delta P)}}{\mu \rho g S_{\text{кл}}} = \\ & = \frac{5,47 \cdot \sqrt{2 \cdot 982,6 \cdot (982,6 \cdot 9,81 \cdot 0,545 + 250000)}}{0,6 \cdot 982,6 \cdot 9,81 \cdot 0,006} = 3260 \\ & \frac{\sqrt{2\rho \cdot (\rho g L + \Delta P)}}{\mu \rho^2 g S_{\text{кл}}} = \\ & = \frac{\sqrt{2 \cdot 982,6 \cdot (982,6 \cdot 9,81 \cdot 0,545 + 250000)}}{0,6 \cdot 982,6^2 \cdot 9,81 \cdot 0,006} = 0,607 \\ & \frac{-2 \cdot (L\rho g + \Delta P)}{\rho g S_{\text{кл}}} = \\ & = \frac{2 \cdot (982,6 \cdot 9,81 + 250000)}{982,6 \cdot 90,545,81 \cdot 0,006} = -8833 \end{aligned}$$

Внутрішній діаметр трубопроводу:

$$d_{\text{вн}} = 200 \text{ мм} = 0,2 \text{ м}$$

$$\text{Швидкість конденсату: } V_{\text{конд.}} = 1,8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$\text{Площа: } S = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,02^2}{4} = 0,031 \text{ м}^2$$

$$\text{Номінальна витрата води: } Q_{\text{води}} = 199,24 \frac{\text{т}}{\text{ч}}$$

$$\text{Площа дзеркала випаровування: } F_3 = 5,47 \text{ м}^2$$

$$\text{Номінальний рівень: } L = 0,545 \text{ м}$$

$$\text{Щільність конденсату: } Q_{\text{води}} = 982,6 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

**Висновок.** Було розглянуто технологічний об'єкт регулювання такий, як група ПНТ, яка застосовується на АЕС з реактором ВВЕР-1000. Також були розглянуті варіанти трубопроводу від ПНТ-4 до ПНТ-3 по витраті конденсату. Була складена функціональна схема регулювання рівня в групі ПНТ.

В результаті роботи був проведений розрахунок динамічних властивостей трубопроводу від ПНТ-4 до ПНТ-3 по витраті конденсату.

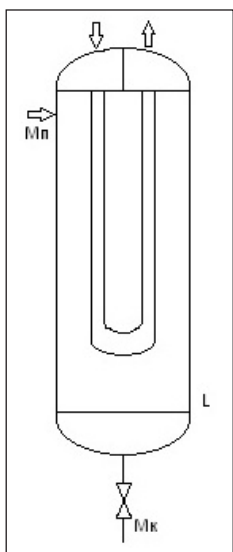


Рис. 2. Теплообмінник без насоса на стоці

**Список літератури:**

1. Преображенський В.П. Теплотехнічні вимірювання та прилади: підручник для вузів за фахом «Автоматизація теплоенергетичних процесів». 3-е изд., Перераб. М.: «Енергія», 1978. 704 с.
2. Демченко В.А. Методичні вказівки до практичних занять з дисципліни «Автоматизація безперервних технологічних процесів» для студентів спеціальності 7.09.250. Одеса: ОДПУ, 2000. 34 с.
3. Демченко В.А. Автоматизація і моделювання технологічних процесів АЕС і ТЕС. Одеса: «Асторпрінт», 2001. 305 с.
4. Проектування систем автоматизації технологічних процесів. А.С. Ключев, Б.В. Глазов, А.Х. Дубровській. М.: Вища школа, 1990. 464 с.

**РАСЧЕТ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТРУБОПРОВОДА ОТ ПНД-4 ПНД-3 ПО РАСХОДУ КОНДЕНСАТА В ГРУППЕ ПНД ЭНЕРГОБЛОКА 1000 МВТ ЗАПОРОЖСКОЙ АЭС**

*Объектом проектирования является технологический участок группы ПНД, входящей во второй контур энергоблока АЭС. Расчет динамических свойств трубопровода от ПНД-4 в ПНД-3 по расходу конденсата в группе подогревателей низкого давления энергоблока 1000 МВт Запорожской АЭС. В тепловой схеме атомной электростанции с реактором типа ВВЭР-1000 применяется система регенерации низкого давления. Эта система предназначена для подогрева основного конденсата, подаваемого конденсационными насосами с главного конденсатора у деаэратора. Применение ПНД повышает КПД установки и существенно влияет на безопасность и надежность АЭС.*

**Ключевые слова:** автоматическая система регулирования, АЭС, подогреватель низкого давления, ВВЭР-1000, динамические свойства трубопровода.

**CALCULATION OF DYNAMIC PROPERTIES OF PIPELINE FROM LPH-4 TO LPH-3 BY CONSUMPTION COSTS IN A GROUP OF LOW PRESSURE OF THE 1000 MW ZAPORIZHIA NUCLEAR POWER PLANT**

*The object of the design is the technological area of the group of low pressure heater, which is included in the second circuit of the NPP power unit. Calculation of the dynamic properties of the pipeline from the low pressure heater-4 to the low-pressure heater-3 by the consumption of condensate in the group of low pressure heaters of the 1000 MW unit of the Zaporizhzhya NPP. In the thermal scheme of a nuclear power plant with a WWER-1000 reactor, a low-pressure regeneration system is used. This system is intended for the heating of the main condensate, which is fed by condensation pumps from the main condenser to the deaerator. The use of a low pressure heater increases the efficiency of the installation and significantly affects the safety and reliability of the NPP.*

**Key words:** automatic control system, NPP, low pressure heater, VVER-1000, dynamic properties of the pipeline.



УДК 681.51

**Бойко О.В.**

Одеський національний політехнічний університет

**Пелих С.В.**

Одеський національний політехнічний університет

## РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ РЕЖИМОМ НАВАНТАЖЕННЯ РЕАКТОРНОЇ УСТАНОВКИ З ВВЕР-1000 З УРАХУВАННЯМ ПАРАМЕТРА ДЕФОРМАЦІЙНОГО ПОШКОДЖЕННЯ ОБОЛОНОК ТВЕЛІВ

*Атомна енергетика сьогодні посідає перше місце з вироблення енергоресурсу. Безперервно збільшується кількість енергії, що виробляється атомними енергетичними станціями (АЕС). У зв'язку з цим все більш актуальним стає питання створення систем управління, які одночасно досягали б максимально ймовірної безпеки та економічності (мінімального параметру пошкодженості оболонок ТВЕЛів та максимальної глибини вигорання палива відповідно).*

*Національна програма розвитку енергетичної галузі України визначає збільшення частки виробітку електроенергії на АЕС до 60%. Крім того, виникає необхідність адаптації діючих і запланованих до будівництва енергоблоків АЕС до специфічних умов роботи в сучасних і перспективних енергосистемах.*

**Ключові слова:** тепловидільний елемент (ТВЕЛ), атомна електрична станція (АЕС), автоматизація, активна зона (АКЗ), передавальна функція.

**Постановка проблеми.** Все більш актуальним стає питання створення систем управління, які одночасно досягали б максимально ймовірної безпеки та економічності (мінімального параметру пошкодженості оболонок ТВЕЛів та максимальної глибини вигорання палива відповідно).

У проектах РУ IV покоління підвищені енергонапруженість активної зони (АКЗ), тривалість кампанії і глибина вигорання ядерного палива, що значно збільшує ризик виникнення аварійних ситуацій під час експлуатації. Головним чинником, що обмежує підвищення цих показників, є довговічність оболонок ТВЕЛів [1, с. 46].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В публікації [7, с. 1–7] показана необхідність і умови розробки автоматизованої системи управління для мінімізації радіоактивних протікань в контур ВВЕР за нормальних умов експлуатації шляхом оптимізації режиму навантаження реактора та перестановок ТВЗ [7, с. 1].

**Постановка завдання.** Метою дослідження є розробка теоретичних і технологічних основ експлуатації ТВЕЛів реактора з урахуванням накопиченої в нормальних умовах пошкодженості їх оболонок для досягнення економічної експлуатації ТВЕЛів за умов їх безпечної роботи в нормальних умовах. Тому завданням цієї публікації є:

– аналіз моделей та методів розрахунку зміни властивостей ТВЕЛу й умов руйнування його оболонки;

– розробка математичної моделі зміни властивостей ТВЕЛу, що враховує основний процес накопичення пошкодженості його оболонки і параметри, що визначають пошкодженість;

– розробка методу розрахунку пошкодженості оболонок ТВЕЛів в нормальних умовах експлуатації з урахуванням основного процесу накопичення пошкодженості і визначення параметрів пошкодженості оболонок;

– розробка принципової схеми АСУ;

– розробка методів управління конструкційними параметрами ТВЕЛа і температурним режимом теплоносія, що враховують пошкодженість оболонок твелів, баланс безпеки та економічності експлуатації твелів;

– розробка методів управління режимом навантаження і властивостями твелів, що враховують глибину вигорання палива та пошкодженість оболонок твелів, баланс безпеки та економічності експлуатації ТВЕЛів.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Реактор ВВЕР-1000 є водо-водяним енергетичним реактором корпусного типу і представляє собою вертикальну циліндричну посудину з еліптичним дном. Розміщення патрубків двурядне, внутрішня частина і частина фланця та кришки покриті

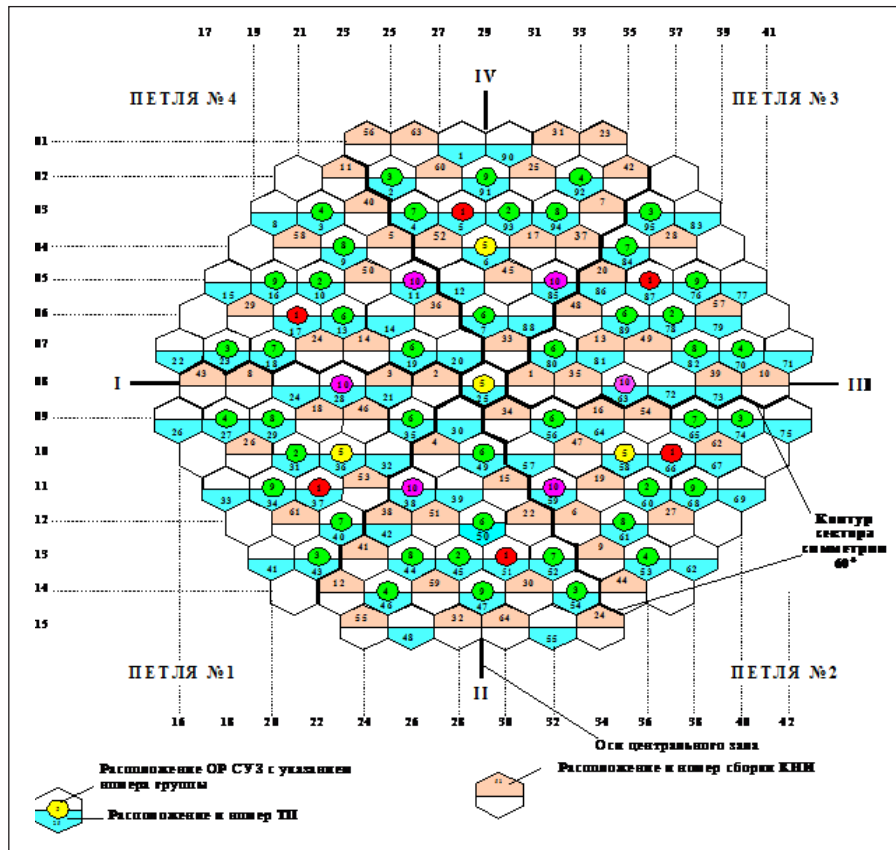


Рис. 1. Картограма активної зони

антикорозійною наплавкою. Корпус реактора зверху закритий кришкою з установленими на ній приводами механізмів СУЗ. За принципом роботи ВВЕР-1000 є гетерогенним ядерним енергетичним реактором корпусного типу на теплових нейтронах. Теплоносієм та сповільнювачем в реакторі є хімічно знесолена вода з борною кислотою, концентрація якої змінюється в процесі експлуатації.

Під час проходження через активну зону теплоносії нагрівається через реакцію поділу ядерного палива.

Теплоносії поступає в реактор через чотири нижніх входних патрубків корпусу, проходить вниз по кільцевому зазору між корпусом та шахтою, далі через перфороване еліптичне днище та опорні труби шахти входить в ТВЗ, з яких складається активна зона. З ТВЗ через перфоровану нижню плиту блока захисних труб (БЗТ) теплоносії виходить в міжтрубне середовище, в кільцевий зазор між шахтою та корпусом та через чотири верхні вихідні патрубків корпусу виходить з реакторів [1, с. 60].

Активна зона призначена для генерації тепла і передачі його з поверхні ТВЕЛів теплоносія першого контуру (рис. 1).

Активна зона реактора належить до пристроїв нормальної експлуатації і до першої категорії сейсмостійкості.

Для режимів порушення умов нормальної експлуатації встановлена межа безпечної експлуатації твेलів: за кількістю та величиною дефектів ТВЕЛ становить 1% ТВЕЛів з дефектами типу газової нещільності і 0,1% ТВЕЛів, для яких наявний прямий контакт теплоносія ядерного палива.

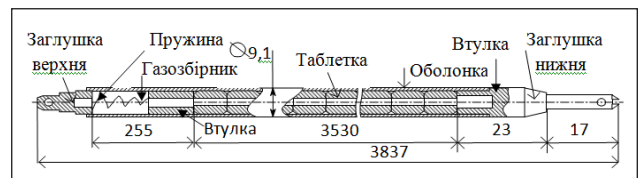


Рис. 2. Конструкція та габаритні розміри ТВЕЛа

Критерієм допустимості встановлених меж пошкодження ТВЕЛів є величина активності води першого контуру.

Експлуатаційною межею обрано значення сумарної питомої активності радіонуклідів йоду 131–135 в теплоносії I контуру  $3,7 \times 10^7$  Бк/кг ( $1,0 \times 10^{-3}$  Ку/кг).

Межею безпечної експлуатації є максимальна сумарна питома активність радіонуклідів йоду 131–135 в теплоносії I контуру 1,85x10<sup>8</sup> Бк/кг (5x10<sup>-3</sup> Ку/кг) [5, с. 160].

Донедавна для реакторів ВВЕР-1000 проекту В-320 застосовувалися ТВЗ з урановим паливом, поглинаючим матеріалом в ПС СУЗ був карбід бору В4С (тип ПС СУЗ 0401.01.04.000), вигоряючими поглиначами були стрижні СВП, що містять CrB<sub>2</sub> + Al – диборид хрому в алюмінієвій матриці. Сьогодні з'явилися нові види паливних касет (типи касет 0401.12.00.000 і 496.00.000 з уран-гадолієвим паливом) і ПС СУЗ (типи ПС СУЗ 0401.12.04.000 і 496.00.070). Наведемо характеристики типів касет, типів ПС СУЗ, пучків СВП.

Касети з уран-гадолієвим паливом, на відміну від касет з урановим паливом, містять 312 ТВЕЛів і 6 так званих твегів, розташованих по краях ТВЗ. Твеги – це паливні елементи, де як паливо використовується суміш діоксиду урану (UO<sub>2</sub>) та оксиду гадолінію (Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Вміст оксиду гадолінію в суміші становить 5 ± 2%. Під час використання в активній зоні реактора касет з уран-гадолієвим паливом не застосовуються пучки СВП – вигоряючим поглиначем слугує гадоліній, який знаходиться прямо в паливі. Це знижує вартість і час проведення ТТО з перевантаженням палива. Крім того, стрижні СВП (CrB<sub>2</sub> + Al – диборид хрому в алюмінієвій матриці) спотворюють поле енерговиділення по радіусу ТВЗ. Використання в активній зоні реактора касет з уран-гадолієвим паливом дозволяє істотно вирівняти поле енерговиділення по радіусу ТВЗ.

Нові ПЗ СУЗ типу 0401.12.04.000 і 496.00.070 мають ту ж поглинаючу здатність, що застосовувалася раніше (300 мм в нижній частині займає титанат диспрозія Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub> • TiO<sub>2</sub>). Під час процесу вага кластера збільшується на 2,5 кг – з 16 кг до 18,5 кг. Застосування обважнених кластерів дозволить скоротити час падіння ОР СУЗ на нижні вимикачі за спрацьовування аварійного захисту (згідно з вимогами, цей час не повинен перевищувати 4 секунди). Передбачається також використовувати в нижній частині ПЗ СУЗ як навантажувач гафній (Hf). Вага такого кластера становитиме 21,2 кг.

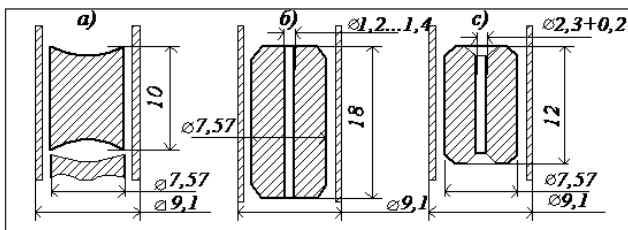


Рис. 3. Паливна таблетка

Спочатку паливні таблетки не мали отворів всередині, їх діаметр становив 7,53 мм, а висота 10 мм (рис. 3-а) Потім збільшилася висота паливних таблеток до 18 мм (рисунок 3-б), всередині з'явився отвір для зниження температури діаметром 1,4 мм (рис. 3-б). Подальша еволюція палива привела до наступних змін:

- знижена висота паливної таблетки (до 12 мм) (рис. 3-с);
- збільшено діаметр внутрішнього отвору таблетки (з 1,4 мм до 2,2 мм);
- у таблетках виконана внутрішня фаска (рис. 3-с);
- збільшена щільність палива;
- виконано напилення на внутрішню поверхню ТВЕЛ;
- збільшено початковий газовий обсяг під ТВЕЛ з 18 см<sup>3</sup> до 30,5 см<sup>3</sup>;
- збільшено тиск гелію всередині ТВЕЛа з 2x10<sup>5</sup> Па до 22x10<sup>5</sup> Па.

Розглянемо вплив цих змін на міцнісні й механічні характеристики палива і оболонки ТВЕЛ.

Збільшення висоти таблетки значно знижує в нормальних умовах експлуатації частку виходу під оболонку ТВЕЛ газоподібних і летючих продуктів поділу палива. Так, при T<sub>UO<sub>2</sub></sub> < 1690°C, шляхом зниження сумарної площі поверхні таблеток, ця частка зменшується з 5% до 2%. Однак це пред'являє більш жорсткі вимоги до швидкості зміни навантаження РУ через можливість розтріскування паливних таблеток по висоті.

Використання збільшеного діаметру внутрішнього отвору:

- знижує акумульовану теплоємність палива;
- знижує внутрішні температурні напруження і деформації в паливі;
- збільшує допустимі глибини вигорання.

Використання в таблетках внутрішньої фаски знижує ймовірність виникнення точкових контактних напружень між оболонкою і паливом внаслідок розтріскування таблеток.

Зниження щільності палива полегшує накопичення газоподібних продуктів поділу в керамічній матриці без виходу їх під оболонку ТВЕЛ за практично незмінного коефіцієнта теплопровідності палива.

Напилення чистого цирконію на внутрішню поверхню ТВЕЛ знижує небезпеку хімічної корозії під напругою на кордоні цирконій-ніобієвих зерен з боку агресивних продуктів поділу палива (I, Cd, Cs та інші). Шляхом поступового утворення плівки діоксиду цирконію ZrO<sub>2</sub>, що створюється в процесі взаємодії чистого цирконію з вивільненого палива з киснем, і є абсолютно стійкою до

агресивних летючих продуктів поділу до температур 800°C. У цьому разі необхідний якийсь час для поступового окислення чистого цирконію, протягом якого, проте, не відбувається руйнування основної оболонки. Наявність захисної плівки  $ZrO_2$  також дозволяє більш ефективно й досить довго утримувати напрацьовані аніони йоду до утворення ними з катіонами цезію з'єднання  $CsI$  – який вже є небезпечним для оболонки [2, с. 55].

Збільшення початкового вільного газового обсягу під ТВЕЛ з 18,0 см<sup>3</sup> до 30,5 см<sup>3</sup> значно полегшує накопичення легких продуктів розподілу (за 100% потужності РУ вільний об'єм становить 21,8 см<sup>3</sup>), особливо за умови збільшеного початкового тиску гелію, що знижує максимально досягнений тиск під ТВЕЛ наприкінці кампанії палива.

Збільшення тиску гелію всередині ТВЕЛа:

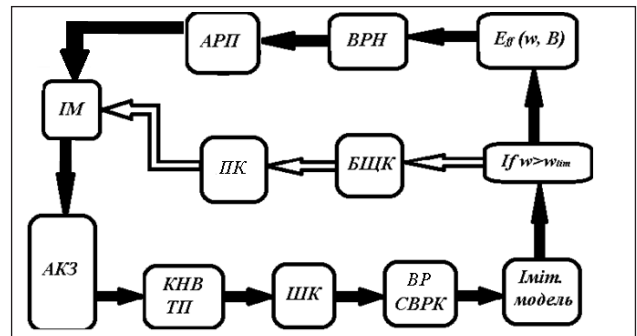
- покращує теплопровідність газового шару;
- зменшує можливість різких контактів оболонка / паливо;
- зменшує локальні згини оболонки під розбухання палива;
- зменшує точкові напруги від розтріскуючих таблеток шляхом загального растягуючого тиску;
- усуває ефект «наповзання» оболонки під час гідровипробувань І контуру (коли під дією тиску відбувається деформація оболонки ТВЕЛа за формою паливних таблеток).

До того ж більш високі рівні тиску під ТВЕЛом в кінці їхньої кампанії компенсуються збільшенням вільного газового об'єму.

Необхідна нам система автоматизованого керування має одночасно забезпечувати економічну та безпечну експлуатацію реакторної установки. Для зручності в систему роботи РУ були додані елементи, що забезпечують автоматизоване управління режимом навантаження, зокрема такі, як Імітаційна модель; блок порівняння параметрів деформаційної пошкоженості; блок розрахунку критерію ефективності; блок вибору режиму навантаження; виконуючий механізм [3, с. 110].

Створена система управління забезпечує автоматичне керування режимом навантаження РУ з реактором типу ВВЕР-1000 згідно з виданим завданням. На рисунку 4 представлена схема АСК режимом навантаження РУ з реактором типу ВВЕР-1000 з урахуванням параметру деформаційної пошкоженості оболонок твєлів.

Розроблена АСУТП передбачає контроль величини пошкоженості твєлів не залежно від паливного циклу. Величина пошкоженості фіксується в потрібний нам момент. Розроблене програмне



**Рис. 4. Структурна схема АСК режимом навантаження, де АКЗ–активна зона реактора, ТП–термопара, КНВ–канал нейтронний вимірюючий, СВРК–система внутрішньореакторного контролю, ВРН–вибір режиму навантаження, БЩК–блочний щит керування, ПК–пульт керування, АРП–Автоматичне регулювання підсилення, ІМ–виконуючий механізм,  $E_g(\omega, B)$  – розроблене програмне забезпечення,  $I_f(\omega > \omega_{lim})$  – розроблене програмне середовище, Іміт. модель. – імітаційна модель, ШК – шафи кросові**

забезпечення аналізує перевищення поточної величини пошкоженості та порівнює з допустимими нормами безпечної експлуатації. Отримані значення відображаються на БЩУ, це дає можливість головному інженеру управління реактором слідкувати за нормами пошкоженості твєлів та у разі перевищення значення пошкоженості за допомогою АРП понизити потужність реактора, тим самим зменшити значення пошкоженості. Цей контроль запобігає розгерметизації твєлів, яка може призвести до повної зупинки всієї ядерної енергетичної установки. Отже, розроблена АСУТП передбачає безпечну та економічну експлуатацію [4, с. 88].

**Висновки.** Практична цінність отриманих результатів полягає в безпечній експлуатації твєлів легко-водяного реактора, яка дозволяє враховувати накопичену в нормальних умовах експлуатації РУ пошкоженість оболонок твєлів; розширити межі і підвищити економічність експлуатації РУ; розробити регламент й автоматизований програмно-технічний комплекс керування властивостями твєлів на стадіях проектування та експлуатації РУ з урахуванням пошкоженості оболонок, балансу безпеки та економічності експлуатації.

У теоретичній частині роботи розглянуті процеси та технічне обладнання, яке бере участь в управлінні перестановками ТВЗ та контролю параметрів активної зони реактора типу ВВЕР–1000.

У проектній частині розроблена автоматизована система управління технологічним проце-

сом експлуатації твєлів легко-водяного реактора з урахуванням накопиченої в нормальних умовах пошкоженості їх оболонок для підвищення еко- номічної ефективності експлуатації твєлів шляхом управління їх властивостями за дотримання вимог безпеки.

#### Список літератури:

1. Pelykh, S.N., Maksimov M.V., Ryabchikov S.D. The prediction problems of VVER fuel element cladding failure theory. Nuclear Engineering and Design. Vol. 302, Part A, (June). 2016. P. 46–55.
2. Pelykh, S.N., Parks G.T., Maksimov M.V. A method for VVER-1000 fuel rearrangement optimization taking into account both fuel cladding durability and burnup. Nuclear Engineering and Design. Vol. 257, № 4. 2013. P. 53–60.
3. Pelykh, S.N., Nikolsky M.V., Maksimov M.V. A method for minimization of cladding failure parameter accumulation probability in VVER fuel elements. Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Physics of Radiation Effect and Radiation Materials Science. Iss. 4. 2014. P. 108–116.
4. Стефанік В.М. Комп'ютерно-інтегрована система управління перестановками ТВС в АКЗ ВВЭР-1000 с учетом поврежденности оболочек твэлов. Автоматизація технологічних і бізнес-процесів. Vol. 8, № 1. 2016. С. 83-89.
5. Пельх С. Н. Основы управления свойствами твэлов ВВЭР. Саарбрюккен, 2013. 160 с.
6. Пелих С.М., Фролов М.О., Наливайко А.В., Хуїю Чжоу. Проблема мінімізації радіоактивних протікань в контур ВВЭР за нормальних умов експлуатації. Праці Одеського політехнічного університету. Вип. 2 (52). Одеса, 2017. С.1-7.

#### ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМОМ НАГРУЗКИ РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ С ВВЭР-1000 С УЧЕТОМ ПАРАМЕТРА ДЕФОРМАЦИОННОГО ПОВРЕЖДЕНИЯ ОБОЛОЧЕК ТВЭЛОВ

*Атомная энергетика занимает первое место по выработке энергоресурса в настоящее время. Непрерывно увеличивается количество энергии, вырабатываемой атомными энергетическими станциями (АЭС). В связи с этим все более актуальным становится вопрос создания систем управления, которые одновременно достигали бы максимально возможной безопасности и экономичности (минимального параметра поврежденности оболочек ТВЭЛов и максимальной глубины выгорания топлива соответственно).*

*Национальная программа развития энергетической отрасли Украины определяет увеличение доли выработки электроэнергии на АЭС до 60%. Кроме того, диктуется необходимость адаптации действующих и планируемых к строительству энергоблоков АЭС к специфическим условиям работы в современных и перспективных энергосистемах.*

**Ключевые слова:** тепловыделяющие элементы (ТВЭЛ), атомная электростанция (АЭС), автоматизация, активная зона (АКЗ), передаточная функция.

#### DEVELOPMENT AND INVESTIGATION OF AUTOMATED SYSTEM OF MANAGEMENT OF LOADING MODE OF REACTOR INSTALLATION WITH VVER-1000 WITH TAKING OF THE PARAMETER OF DEFORMATION DAMAGE OF ENVELOPES OF HEAT-CONDUCTING ELEMENTS

*Atomics is at ranks first to produce energy at the present time. The amount of energy produced by nuclear power plants (NPPs) is continuously increasing. In connection with this, the issue of creating control systems that simultaneously achieve the most probable safety and economy (the minimum parameter of damage to the envelopes of fuels elements and the maximum depth of fuel burn, respectively) is becoming more and more actual.*

*The National Program for the Development of the Energy Industry of Ukraine determines the increase of the share of power generation at the NPP to 60%. In addition, the necessity of adapting existing and planned NPP power units to the specific conditions of work in modern and perspective power systems is dictated.*

**Key words:** heat-conducting element (HCE), atomic power station (NPP), automation, active zone(AZ), transfer function.

**Бородкіна І.Л.**

Київський національний університет культури і мистецтв

**Бородкін Г.О.**

Національний університет біоресурсів і природокористування України

## МЕТОДИ Й ТЕХНОЛОГІЇ ЗАХИСТУ ІНФОРМАЦІЇ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОННОГО ДОКУМЕНТООБІГУ

*Для швидкого та якісного управління в установах різного рівня все більш широко використовуються системи електронного документообігу. Сьогодні існує велика кількість методів і технологій захисту інформації, призначених забезпечити конфіденційність, цілісність і доступність інформації, що циркулює в цих системах. У роботі представлена систематизація та класифікація сучасних методів і технологій захисту інформації в системах електронного документообігу, наведені їх переваги й недоліки. Виконане дослідження спрямоване на полегшення організації системи комплексного та ефективного захисту інформації під час використання систем електронного документообігу.*

**Ключові слова:** електронний документ, електронний документообіг, система електронного документообігу, захист інформації, шифрування даних.

**Постановка проблеми.** Починаючи з останніх десятиріч ХХ століття спостерігається постійне розширення сфер застосування комп'ютерних мереж, збільшення кількості користувачів як локальними комп'ютерними мережами, так і мережами, підключеними до глобальної комп'ютерної мережі Інтернет. Це призводить до зменшення інформаційної закритості даних, які зберігаються на мережених серверах і клієнтських комп'ютерах організацій та установ.

Однією зі сфер застосування комп'ютерних мереж останніми роками стало впровадження в органи державної влади й управління систем електронного документообігу. За таких умов національна безпека країни істотно залежить від інформаційної безпеки, забезпечення захисту інформації, що зберігається й опрацьовується в системах електронного документообігу органів державної влади та управління. При цьому в ході технічного прогресу ця залежність зростатиме.

Отже, розвиток інформаційних технологій, широке розповсюдження мережі Internet і постійне зростання вартості інформації зумовлюють той факт, що захист даних у системах електронного документообігу сьогодні являє собою одну з найважливіших проблем у сфері інформаційних технологій.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Із 1 січня 2006 року в Україні набрав чинності Закон України «Про захист інформації в інформаційно-телекомунікаційних системах» [1]. Відповідно до цього Закону, захист інформації в

системі – це діяльність, спрямована на запобігання несанкціонованим діям щодо інформації в системі. Закон визначає, що об'єктами захисту в інформаційній системі є інформація, що обробляється в ній, і програмне забезпечення, яке призначено для обробки цієї інформації.

Більш детально поняття «об'єкт захисту» розглянуто в роботі Т. Нішанбаєва, Ф. Рахімова [5], де під об'єктом захисту розуміється такий структурний компонент системи, в якому знаходиться або може знаходитись інформація, що підлягає захисту. Об'єкт захисту повинен відповідати таким умовам:

- належати до одного й того ж організаційного компонента системи;
- брати участь у здійсненні одних і тих самих функцій, пов'язаних з автоматизованою обробкою інформації в системі;
- бути локалізованим (обмеженим) з погляду територіального розташування системи.

Захисту в комп'ютерній системі підлягає будь-яка документована інформація, неправомірне поводження з якою може завдати збитків її власнику, користувачу або іншій особі. Передусім сюди належать відомості, що являють собою державну таємницю; конфіденційна документована інформація; інформація, яка є власністю держави, або інформація з обмеженим доступом, вимога щодо захисту якої встановлена законом, персональні дані, що зберігаються в інформаційних системах.

Цілями захисту інформації в інформаційно-телекомунікаційних системах є [1; 5]:

1. запобігання витоку, розкраданню, втраті, спотворенню, підробці інформації;

2. запобігання загрозам безпеки особистості, суспільства, держави;

3. запобігання несанкціонованим діям щодо знищення, модифікації, спотворення, копіювання, блокування інформації;

4. запобігання іншим формам незаконного втручання в інформаційні системи, забезпечення правового режиму документованої інформації як об'єкта власності;

5. збереження державної таємниці, конфіденційності документованої інформації відповідно до законодавства;

6. захист конституційних прав громадян на збереження особистої таємниці й конфіденційності персональних даних, що є в інформаційних системах;

7. забезпечення прав суб'єктів в інформаційних процесах і під час розробки, виробництва й застосування інформаційних систем, технологій і засобів їх забезпечення.

Згідно із Законом [2], захист інформації в інформаційній системі повинен здійснюватись шляхом створення комплексної системи захисту інформації з використанням засобів захисту інформації, які мають сертифікат відповідності або позитивний експертний висновок за результатами державної експертизи у сфері технічного та/або криптографічного захисту інформації. Закон визначає два напрями, у яких повинен здійснюватись захист інформації: технічний і криптографічний.

Технічний захист інформації – вид захисту інформації, спрямований на забезпечення за допомогою інженерно-технічних заходів і/або програмних і технічних засобів унеможливлення витоку, знищення та блокування інформації, порушення цілісності й режиму доступу до інформації.

Криптографічний захист інформації – вид захисту інформації, що реалізується шляхом перетворення інформації з використанням спеціальних (ключових) даних з метою приховування/відновлення змісту інформації, підтвердження її справжності, цілісності, авторства тощо.

У процесі розробки систем захисту інформації до них напрацьовалися деякі загальні вимоги, які сформульовані Ж. Солцером та М. Шредером (США) [3; 4]:

1. Простота механізму захисту. Чим краще збігається уявлення користувача про систему захисту з її фактичними можливостями, тим менше помилок виникатиме в процесі роботи.

2. Дозволи повинні переважати над заборонами. Нормальним режимом роботи вважається відсутність доступу, а механізм захисту повинен бути заснований на умовах, при яких доступ дозволяється. Допуск до інформації надається лише тим користувачам, яким він необхідний.

3. Перевірка повноважень користувача при будь-якому зверненні до будь-якого об'єкта інформації. Це означає, що захист здійснюється на загальносистемному рівні й припускає абсолютно надійне визначення джерела будь-якого звернення до інформації.

4. Розділення повноважень. Надійний захист інформації в системі потребує визначення мінімального круга повноважень для будь-якої програми й будь-якого користувача системи.

5. Трудомісткість проникнення в систему. Чинник трудомісткості залежить від кількості проб, які потрібно зробити для успішного проникнення в систему.

6. Реєстрація проникнень у систему. Іноді вважають, що вигідніше реєструвати випадки проникнення, ніж будувати складні системи захисту.

Отже, під захистом інформації в системах електронного документообігу як різновиді інформаційних систем колективного використання варто розуміти сукупність методів і засобів, що забезпечують цілісність, конфіденційність, достовірність, автентичність і доступність (тобто можливість використання) інформації в умовах дії на неї загроз природного або штучного характеру.

Регулярне застосування засобів і методів захисту інформації допомагає забезпечити потрібну надійність інформації, що зберігається та обробляється з використанням засобів системи електронного документообігу [5; 6]. При цьому під надійністю інформації в системі електронного документообігу розуміється інтегральний показник, який характеризує якість інформації з погляду:

– фізичної цілісності, тобто наявності або відсутності спотворень або знищення елементів цієї інформації;

– довіри до інформації (автентичності), тобто наявності (відсутності) в ній підміни (несанкціонованої модифікації) її елементів при збереженні цілісності;

– безпеки інформації (конфіденційності), тобто наявності (відсутності) несанкціонованого отримання її особами або процесами, які не мають на це відповідних повноважень;

– недопущення несанкціонованого розмноження інформації.

Ефективність захисту інформації в системі електронного документообігу досягається лише в тому випадку, якщо забезпечується її надійність на всіх об'єктах та елементах системи, які можуть бути піддані загрозам з боку дестабілізуючих факторів.

Складність вирішення завдань захисту інформації в системах електронного документообігу зумовлюють такі фактори:

1. високі вимоги до цілісності системного та прикладного програмного забезпечення;
2. високі вимоги до цілісності електронних документів (довідкові, статистичні, звітні документи, інструкції тощо), що зберігаються в системі;
3. перехід на безпаперову технологію вимагає забезпечення юридичної значущості електронних документів;
4. розподілене використання ресурсів системи електронного документообігу вимагає забезпечення безпеки інформації на рівні розмежування доступу до інформації;
5. низка електронних документів вимагає забезпечення безпеки на рівні утаєння змісту документа, а в деяких випадках і недопущення несанкціонованого розмноження.

Отже, всі засоби, призначені для захисту інформації, у той чи інший спосіб регламентують, забороняють або обмежують користувачам можливість доступу до тієї або іншої інформації.

**Постановка завдання. Мета статті** – проаналізувати й узагальнити інформацію про наявні сьогодні засоби, методи підходи та технології захисту інформації в системах електронного документообігу.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Виходячи зі структури системи електронного документообігу, до об'єктів захисту в системах електронного документообігу можна зарахувати:

- робочі станції користувачів системи;
- робочі станції адміністраторів (мережі, бази даних, системи захисту тощо);
- сервери (мережеві, баз даних, додатків);
- апаратуру зв'язку (модеми, маршрутизатори);
- канали зв'язку (виділені або комутовані);
- периферійні пристрої колективного використання;
- приміщення, пов'язані з автоматизованою обробкою інформації (місця встановлення обладнання, сховища машинних носіїв інформації тощо).

Найпоширенішими шляхами витоку інформації із системи електронного документообігу, як і з будь-якої інформаційної системи, є:

- викрадення носіїв інформації та документів, які є результатом роботи системи;
- копіювання інформації на ПК;
- несанкціоноване підключення до апаратури та ліній зв'язку;
- перехоплення електромагнітного випромінювання в процесі обробки інформації.

Крім того, користувачі системи можуть припускатися різних помилок і бути предметом зловживань.

Запобігання витоку інформації із системи переліченими вище шляхами здійснюється як технічними, так і криптографічними методами захисту інформації. На жаль, фізичний доступ сторонніх до конфіденційної інформації, що зберігається на жорстких дисках комп'ютерів робочих станцій або серверів, не завжди можна виключити за допомогою організаційних заходів і технічних методів захисту (відомі приклади, коли, незважаючи на всі запобіжні засоби, особливо цінна інформація просто викрадалася шляхом вилучення носія, на якому ця інформація зберігалась). Для убезпечення даних на випадок вилучення носіїв необхідно застосовувати процедури криптографічного перетворення інформації, які посідають особливе місце в будь-якій інформаційній системі, в тому числі й у системі електронного документообігу, оскільки саме вони захищають безпосередньо документи. У результаті перетворення інформації вміст документів стає недоступним без застосування відповідного ключа та зворотного перетворення. Залежно від способу використання натепер існують симетрична та асиметрична криптографічні системи. Симетричні криптосистеми для шифрування й дешифрування використовують один ключ. Недоліком таких систем варто вважати складність передачі ключа. Існує проблема пошуку надійного способу обміну ключами.

В асиметричних криптографічних системах для шифрування й дешифрування використовуються різні ключі. Ключ шифрування є відкритим, а таємність ключа дешифрування зберігається. При цьому відкритий ключ шифрування складений так, що він не дає змоги обчислити секретний ключ дешифрування. Математичний взаємозв'язок між закритим і відкритим ключами робить кожну пару ключів унікальною.

Принципи асиметричної криптографії покладено в основу механізму захисту документів з



використанням електронного цифрового підпису, який набуває все більшого розповсюдження в системах електронного документообігу. У таких системах також використовуються закритий і відкритий ключі електронного цифрового підпису. Відкритий ключ відомий усім користувачам системи й призначений для перевірки електронного цифрового підпису. Він допомагає визначити автора підпису та достовірність електронного документа, не даючи змоги обчислити секретний ключ.

Застосування криптографічних методів захисту інформації допомагає захищати безпосередньо інформацію, а не доступ до неї. Завдяки цим методам забезпечуються дані безпосередньо в першоджерелі системи електронного документообігу – в базі даних, сховищі, на сервері. Однак постійне шифрування й дешифрування інформації призводить до суттєвого зниження продуктивності бази даних і, відповідно, системи загалом.

Проблему можна вирішити шляхом побудови відповідної стратегії захисту інформації, тобто раціонального використання комбінації різних рівнів захисту – від апаратного рівня до рівня програмних додатків.

Крім криптографічних методів захисту інформації, застосовуються методи стеганографічного захисту інформації, тобто методи, які приховують сам факт існування повідомлення й не дають змоги сторонній особі дізнатися про його існування. Сьогодні існує багато методів стеганографічного захисту інформації, які базуються на фізичних, хімічних, голографічних та інших підходах [7].

Цифрова стеганографія базується на приховуванні або вбудовуванні додаткової інформації в цифрові (як правило, мультимедійні) об'єкти, викликаючи при цьому деякі їх спотворення без втрати функціональності. Методи стеганографії допомагають замінити несуттєві частки даних на конфіденційну інформацію, оскільки можливості людини розрізняти дрібні зміни кольору або звуку обмежені. До переваг класичної стеганографії можна зарахувати доступність засобів реалізації, а основними недоліками є складність практичної реалізації та можливість випадкового вияву повідомлення. Стеганографія зазвичай використовується спільно з методами криптографії, доповнюючи її.

Новим і дуже перспективним напрямом у технологіях захисту інформації є поєднання USB-брелків або смарт-карток і спеціального

програмного забезпечення, призначеного для шифрування даних. Така технологія одержала назву Secret Disk. Вона заснована на принципі шифрування даних на жорсткому диску, при цьому доступ до них можна отримати тільки за допомогою допоміжного ключа, який зберігається на зовнішньому пристрої (USB-брелці або смарт-карті). Перевага такого рішення полягає в тому, що захист даних забезпечується за допомогою алгоритму переміщення даних, а для того, щоб дістати доступ до зашифрованих даних, потрібні спеціальний пристрій (USB-брелок або смарт-картка) і введений із клавіатури пароль.

Принцип захисту даних за допомогою системи Secret Disk полягає в створенні на комп'ютері користувача (або сервері компанії) захищеного ресурсу – секретного диску, призначеного для безпечного зберігання конфіденційної інформації. У разі збереження дані в захищених ресурсах шифруються. Доступ до цієї інформації та її розшифровка здійснюються тільки після приєднання до USB-порту комп'ютера електронного ключа. Отже, інформація, захищена системою, доступна тільки її власникам. Проте, якщо інформація, яка зберігається на цьому захищеному ресурсі, необхідна декільком його колегам, власник може дати їм право цієї інформацією користуватися. Для цього їм необхідно тільки мати власний електронний ключ. Інші користувачі не бачитимуть захищений ресурс, для них він буде недоступним. Вони можуть навіть і не здогадуватись про його наявність.

**Висновки.** Сучасний розвиток комп'ютерних технологій створив необхідні умови для впровадження в процеси управління установами систем електронного документообігу. При цьому актуальності набула проблема забезпечення інформаційної безпеки на всіх рівнях впровадження та експлуатації таких систем. Виникла потреба створення комплексної системи захисту інформації, що охоплюватиме весь життєвий цикл систем електронного документообігу – від розробки до утилізації – і весь технологічний ланцюжок збирання, передавання, зберігання, обробки й видачі інформації. Проаналізувавши всі можливі способи захисту та утаємнення інформації в системах електронного документообігу, можна резюмувати, що лише комплексне застосування всіх відомих на теперішній час організаційних, апаратних і програмних засобів у змозі забезпечити необхідний рівень таємності інформації.

**Список літератури:**

1. Про захист інформації в інформаційно-телекомунікаційних системах: Закон України. Відомості Верховної Ради України (ВВР). 1994. № 31. С. 286.
2. Про інформацію: Закон України. Відомості Верховної Ради України (ВВР). 1992. № 48. С. 650.
3. Боровікова Н. Способи захисту конфіденційної інформації. URL: <http://www.aladdin.ru/press/archive/article282.php>.
4. Домарев В.В. Безопасность информационных технологий. Системный подход. Киев; Москва; Санкт-Петербург: Торгово-издательский дом «DiaSoft», 2004. 975с.
5. Нішанбаєв Т., Рахімов Ф. Основи системного захисту даних в розподілених інформаційних системах. URL: [http://ru.infocom.uz/more.php?id=A747\\_0\\_1\\_0\\_M](http://ru.infocom.uz/more.php?id=A747_0_1_0_M).
6. Захист інформації в процесі зберігання. URL: <http://www.securit.ru/solutions/store/>.
7. Сучасні стеганографічні методи захисту інформації / О. Стасюк, С. Гнатюк, Н. Довгич, М. Літош. Захист інформації. 2011. URL: <http://jrn1.nau.edu.ua/index.php/ZI/article/view/1994.doi:10.18372/2410-7840.13.1994>.

**МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ  
В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОННОГО ДОКУМЕНТООБОРОТА**

*Для быстрого и качественного управления в учреждениях различного уровня все более широко используются системы электронного документооборота. На сегодняшний день существует большое количество методов и технологий защиты информации, предназначенных обеспечить конфиденциальность, целостность и доступность информации, циркулирующей в этих системах. В работе представлена систематизация и классификация современных методов и технологий защиты информации в системах электронного документооборота, описаны их преимущества и недостатки. Проведенное исследование направлено на облегчение организации системы комплексной и эффективной защиты информации при использовании систем электронного документооборота.*

**Ключевые слова:** электронный документ, электронный документооборот, система электронного документооборота, защита информации, шифрование данных.

**METHODS AND TECHNOLOGIES OF INFORMATION  
SECURITY IN ELECTRONIC MANAGEMENT SYSTEMS**

*Electronic document management systems are increasingly used for fast and high-quality management in institutions of various levels. Today, there are many methods and technologies for protecting information designed to ensure the confidentiality, integrity and availability of information circulating in these systems. The paper presents the systematization and classification of modern methods and technologies of information security in electronic document circulation systems, their advantages and disadvantages are presented. The research is aimed at facilitating the organization of the system of integrated and effective information protection in the use of electronic document management systems.*

**Key words:** electronic document, electronic document management, electronic document management system, data protection, data encryption.

**Вовк І.В.**

Одеський національний політехнічний університет

## АВТОМАТИЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИГОТОВЛЕННЯ КАВІТАЦІЙНОГО ВОДНО-ВУГІЛЬНОГО ПАЛИВА

У статті розроблено технологічну схему виготовлення ВВП, функціональну схему автоматизації, математичну модель регулювання подачі вугільного пилу. За допомогою програмного забезпечення SCADA Trace Mode розроблено екранні форми.

З огляду на те, що вугілля дешевше за мазут і газ, треба також розуміти, що спалювання вугілля на ТЕС зовсім не просто забезпечує нас енергією й виходить вона не дуже дешевою, так як використання вугілля на ТЕС зумовлює обростання в основному технологічному ланцюгу електростанції: спалювання вугілля в топці котла й отримання пара за допомогою турбіни, що обертає електрогенератор, енергія від якого видається в систему цілим букетом допоміжних і додаткових вузлів, у тому числі забезпечує розвантаження, зберігання, приготування та подачу на спалювання. Сюди входять залізничне господарство, вагоноопрокидувачі, тракти подачі палива з вузлами пересипок, дробарками, бункерами, млинами й пилосистемами. І переробляється вугілля сотні, а то й тисячі тонн на годину. Вугілля розсипається, самозаймається, пилить, а пил вибухає. Тому заявляються системи пилопригнічення, аспірації, гідрозмиву з очисними спорудами. Усі ці додаткові вузли збільшують обсяги й вартість будівництва ТЕС, ускладнюють роботу експлуатаційного персоналу, не забезпечуючи стовідсоткової гарантії безпеки та нормальних санітарно-гігієнічних умов роботи.

**Ключові слова:** ТЕС, енергія, вугілля, SCADA Trace Mode, математична модель.

**Постановка проблеми.** Сьогодні багато говорять про розширення використання альтернативних, відновлювальних, нетрадиційних джерел енергії, але все це перспективні джерела, а в практичному плані необхідно зосередитися на традиційних джерелах і передусім повномасштабному поверненні в енергетику вугілля.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Водно-вугільне паливо, водно-вугілля (скорочення: ВУТ, ВВП, CWS, CWSM, CWM) – рідке паливо, яке отримують шляхом змішування подрібненого вугілля, води і пластифікатора. Використовується на теплогенеруючих об'єктах в основному як альтернатива природному газу й мазуту. Дає змогу істотно скоротити витрати під час виробництва теплової та електричної енергії. Концептуально належить до технології «CLEAN COAL» [1, с. 76–95].

Водно-вугілля має задані реологічні (в'язкість, напруга зсуву), седиментаційні (збереження однорідності в статичних і динамічних умовах) і паливні (енергетичний потенціал, повнота вигорання органічних сполук) характеристики. Параметри водно-вугілля чітко регламентовані національними стандартами Китаю, які можуть застосовуватися як еталон. Також для водно-вугільного палива характерні такі властивості: температура займання – 800–850 °С, температура горіння – 950–1150 °С, теплотворна здатність – 3700 ... 4700 ккал. Ступінь згорання вуглецю – понад 99%. Водно-вугілля пожежо- та вибухобезпечне.

Основний принцип у приготуванні водно-вугільного палива полягає в забезпеченні стабільності подрібнення вугілля із заданими параметрами й чіткому дотриманні концентрацій допоміжних речовин, що призводить до поліпшення реологічних властивостей і стабільності процесу горіння.

Натепер існують різні способи помелу вугілля, але найбільш відпрацьований і вивчений спосіб полягає у використанні кульових млинів безперервного мокрого розмелювання.

Вугілля газових марок доставляється на відкритий майданчик заводу. Фронтальний навантажувач подає вугілля в приймальний бункер двохвалкової дробарки, звідки розмелене до фракції 3–6 мм вугілля направляється для подальшого помелу в кульовий млин, де за допомогою дозаторів подаються технічна вода і присадка. Відбувається мокрий помел вугілля з присадкою до фракції 0–300 мкм. Водно-вугільне паливо через фільтр завантажується в накопичувальні ємності з пристроєм. Паливо фракції 71–300 мкм повертається в млин для подальшого помелу. Готове паливо з накопичувальної ємності завантажується в цистерни для транспортування.

Як видно з класифікації та якісних вимог до водно-вугільного палива, для приготування має застосовуватися тільки високоякісне енергетичне вугілля з низьким умістом сірки й золи.

У процесі приготування палива значна увага приділяється контролю елементарного складу.

Це зумовлено необхідністю дотримання екологічних норм, а також дає змогу продовжити термін експлуатації обладнання. Тому для приготування палива використовують тільки попередньо підготовлену очищену воду.

Використання пластифікаторів у водно-вугільному паливі зумовлено необхідністю забезпечення особливих характеристик: низькою в'язкістю, гарною плинністю, тривалою стабільністю зважених часток вугілля. Найбільш часто застосовуються домішки на основі технічних лігносульфонатів, гумінові реагенти (натрієві солі гумінових кислот різних фракцій), поліфосфати, які ефективно діють у лужному середовищі (при pH = 9 ÷ 13 при 40% води в паливі).

**Постановка завдання. Мета статті** – автоматизувати технологічний процес виготовлення кавітаційного водно-вугільного палива; розробити технологічну схему виготовлення, функціональну схему автоматизації, математичну модель регулювання подачі вугільного пилу; зняти перехідний процес регулювання під час подачі вугільного пилу; за допомогою програмного забезпечення SCADA Trace Mode розробити екранні форми.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Водно-вугільне паливо (ВВП) – це суміш, яка на 60–70% складається з тонко подрібненого вугілля й на 29–39% – з води. Ще один відсоток припадає на пластифікатори, які не дають суспензії змоги розшаруватися на складові компоненти й підтримують її однорідність [2, с. 10–20].

Основний принцип у приготуванні водно-вугільного палива полягає в забезпеченні стабільності подрібнення вугілля із заданими параметрами та чіткому дотриманні концентрацій допоміжних речовин, що призводить до поліпшення реологічних властивостей і стабільності процесу горіння.

У змішувач подаємо воду, вугільний пил, емульгатор та обурення. Далі йде процес змішування, і на виході ми отримуємо водно-вугільне паливо. Будемо управляти подачею води й вугільного пилу.

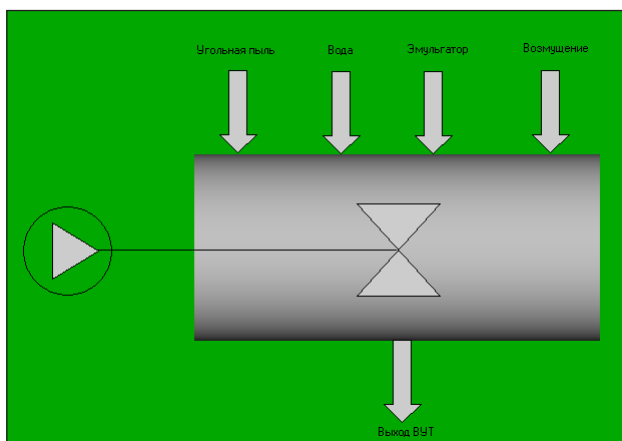


Рис. 1. Технологічна схема виготовлення ВВП

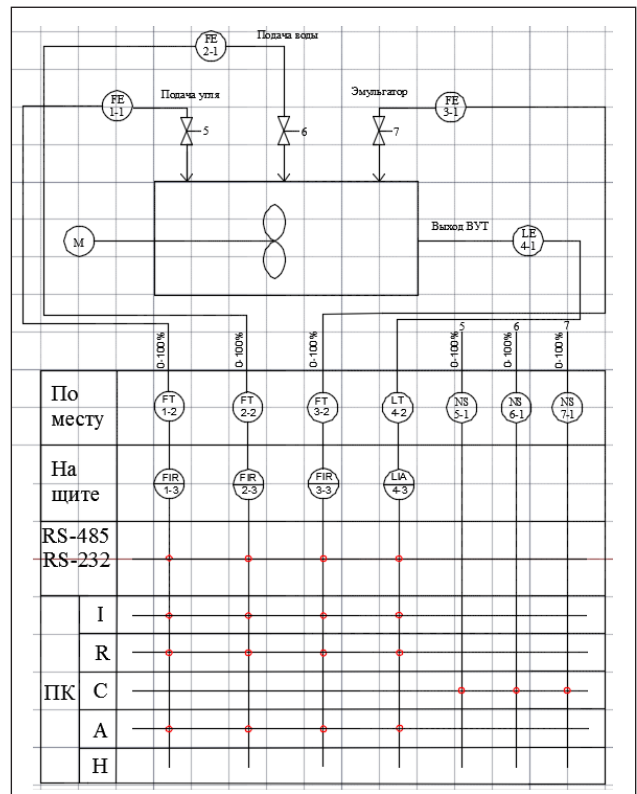


Рис. 2. Функціональна схема автоматизації

Опис елементів

FE	Первинний вимірювальний перетворювач для вимірювання витрати, установлений за місцем (діафрагма, сопло Вентурі, датчик індукційного витратоміра тощо).
FT	Прилад для вимірювання витрати безшкальний з дистанційним передаванням показань, установлений за місцем (безшкальний дифманометр, ротаметр з пневмо- або електропередачею).
LE	Первинний вимірювальний перетворювач для вимірювання рівня, встановлений за місцем (датчик електричного або ємнісного рівнеміра).
LT	Прилад для вимірювання рівня з контактним пристроєм безшкальний з дистанційним передаванням показань, установлений за місцем (рівнемір безшкальний із пневмо- або електропередачею).
LIA L	Прилад для вимірювання рівня з контактним пристроєм, установлений на щиті (вторинний показує прилад із сигналізацією верхнього та нижнього рівнів).
FIA	Прилад для вимірювання витрати з контактним пристроєм, установлений на щиті.

Математична модель регулювання подачі вугільного пилу [3, с. 54–61].

Для настройки ПІ регулятора потрібно спочатку встановити постійну часу інтегрування, що дорівнює нулю, а коефіцієнт пропорційності є максимальним.

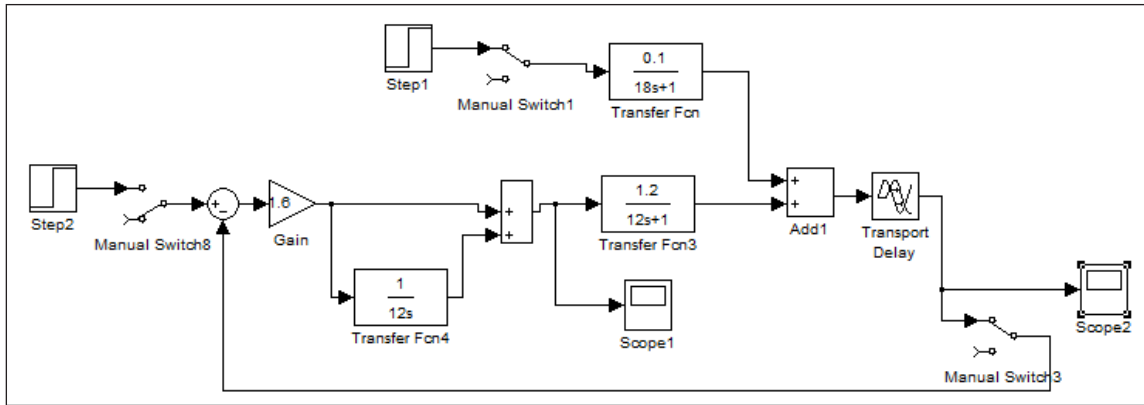


Рис. 3. Схема моделі подачі вугільного пилу

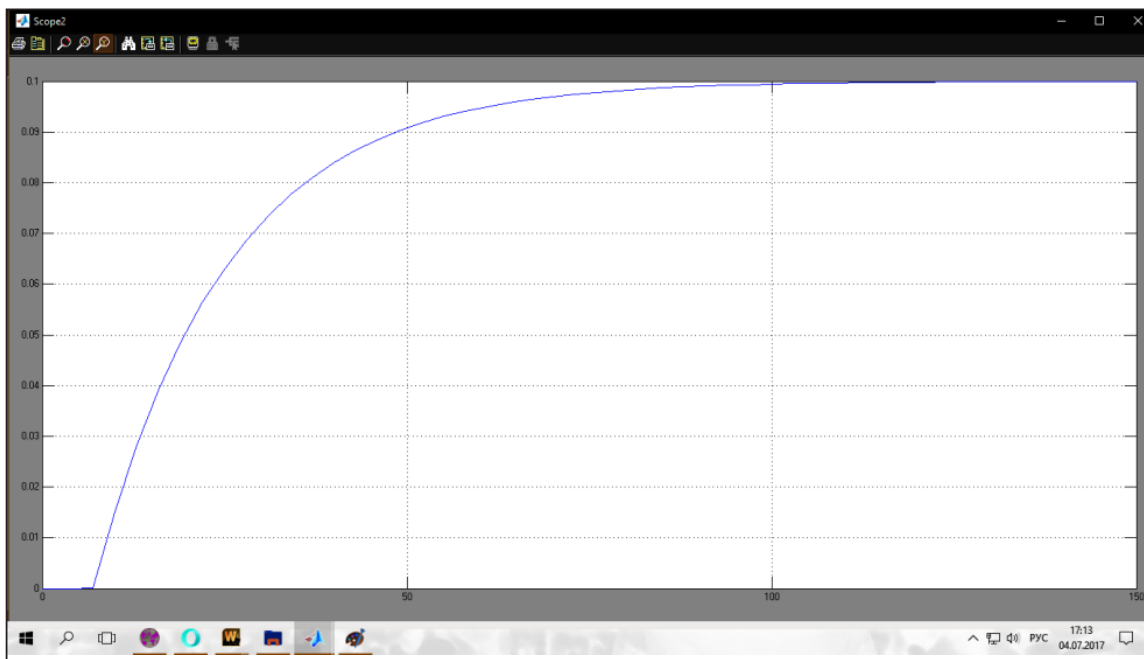


Рис. 4. Крива розгону по каналу «збурення»

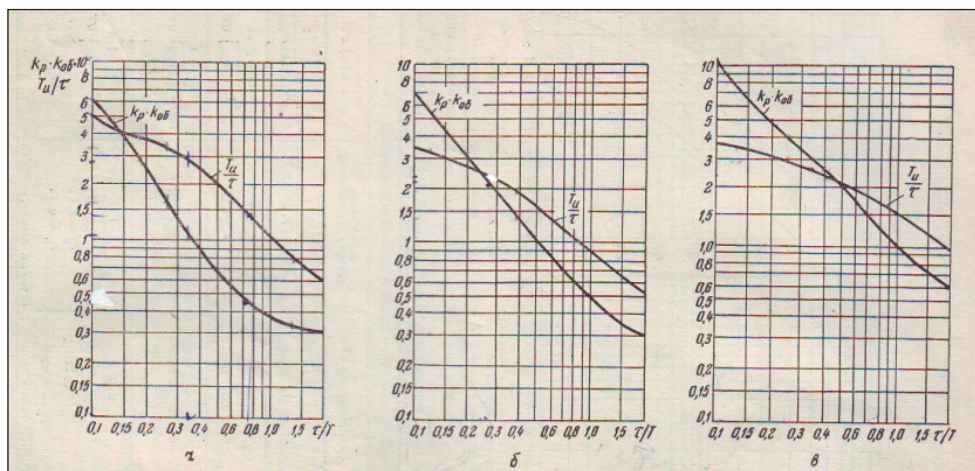


Рис. 5. Номограми налагодження ПІ-регулятора на статичному об'єкті:  
 а – аперіодичний процес; б – 20-процентне перерег.;  
 в – процес із  $\min |2(t)d$  [4, с. 72–85]

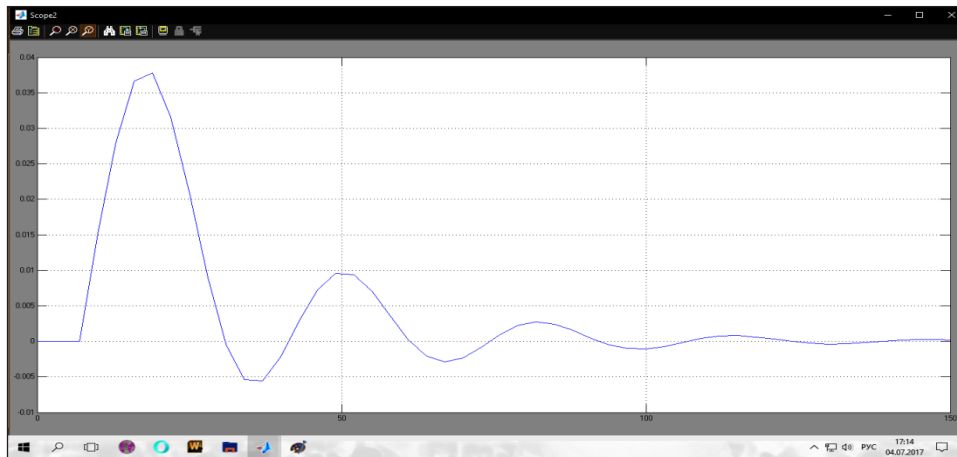


Рис. 6. Перехідний процес регулювання подачі вугільного пилу

Потім, як і при налаштуванні пропорційного регулятора, зменшенням коефіцієнта пропорційності потрібно домогтися появи в системі незатухаючих коливань. Близьке до оптимального значення коефіцієнта пропорційності буде в два рази більшим за те, при якому виникли коливання, а близьке до оптимального значення постійної часу інтегрування – на 20% меншим за період коливань.

Отримаємо:

$$a = \frac{\tau}{T} = \frac{7}{12} = 0,5. \quad (1)$$

Знайдемо оптимальні настройки регулятора методом Копеловича.

У нашому випадку ми беремо графік аперіодичного процесу:

$$T_u = 2 * \tau = 1.7 * 7 = 12 \text{ (с)} \quad (2)$$

$K_p * K_{об} = 1$ , звідки

$$K_p = \frac{1}{K_{об}} = \frac{1}{1.2} \quad (3)$$

$$\frac{T_i}{\tau} = 1.7, \quad (4)$$

де  $K_o$  – коефіцієнт посилення об'єкта,  $\tau$  – транспортне запізнювання,  $T$  – постійна часу об'єкта регулювання.

SCADA-система Trace Mode розроблена і продовжує вдосконалюватися фірмою-виготовлювачем AdAstra Research Group, Ltd. Один із останніх продуктів – 6 версія Trace Mode, що містить повний набір програмних засобів для створення АСУТП та АСУВ. SCADA-система Trace Mode містить засоби розробки операторського інтерфейсу (SCADA/HMI), програмування контролерів (Softlogic), управління основними фондами (EAM), персоналом (HRM) і виробничими процесами (MES) [5, с. 102–110].

**Висновки.** У роботі розглянута автоматизація технологічного процесу виготовлення кавітаційного водно-вугільного палива.

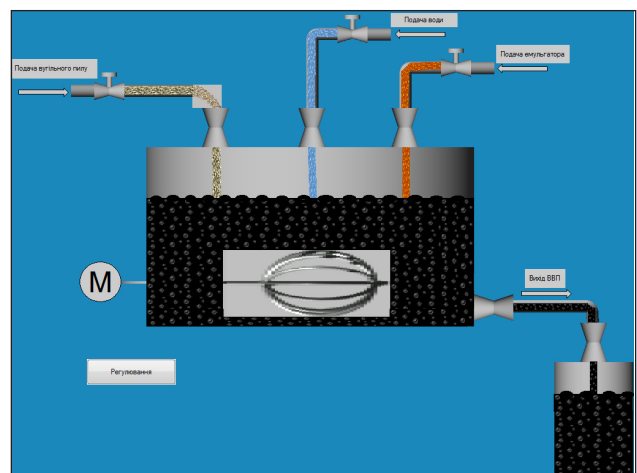


Рис. 7. Вікно мнемосхеми технологічної ділянки регулювання

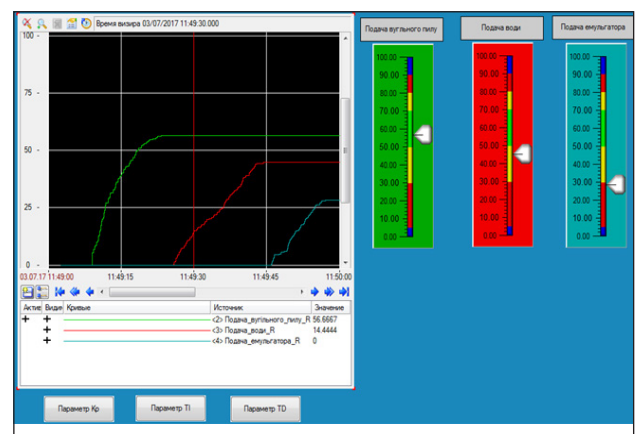


Рис. 8. Екранна форма «Регулювання»

Розроблена технологічна схема виготовлення ВВП, функціональна схема автоматизації, математична модель регулювання подачі вугільного пилу та побудовані перехідні процеси регулювання по каналу «подача вугільного пилу». За допомогою програмного забезпечення SCADA Trace Mode розроблено екранні форми.

**Список літератури:**

1. Зайденварг В.Е., Трубецкой К.Н., Мурко В.І. Виробництво та використання водо-вугільного палива. Москва, 2001. С. 76–95.
2. Долинський А.А., Халатов А.А. Водо-вугільне паливо: перспективи використання в теплоенергетиці і житлово-комунальному секторі. Київ, 2005. С. 10–20.
3. Результати чисельного моделювання процесу спалювання водо-вугільного палива / В.І. Мурко, С.А. Цецоріна, В.І. Федяєв, В.І. Карпенко. Харків, 2003. С. 54–61.
4. Кон Л.І. Методичні вказівки і таблиці для вибору налаштувань ПІ- і П-регуляторів в одноконтурних системах регулювання теплових об'єктів з запізненням. Одеса, 1975. С. 72–85.
5. П'явченко Т.А. Навчальний посібник з технічних дисциплін. Проектування АСУТП в SCADA-системі. Таганрог, 2007. С. 102–110.

**АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ  
КАВИТАЦИОННОГО ВОДНО-УГОЛЬНОГО ТОПЛИВА**

*В статье разработаны технологическая схема изготовления ВВП, функциональная схема автоматизации, математическая модель регулирования подачи угольной пыли. С помощью программного обеспечения SCADA Trace Mode разработаны экранные формы.*

*Так как уголь дешевле мазута и газа, необходимо также понимать, что сжигание угля на ТЭС совсем не просто обеспечивает нас энергией и выходит она не очень дешевой, использование угля на ТЭС определяет обрастание в основном технологической цепи электростанции: сжигание угля в топке котла и получение пара с помощью турбины вращает электрогенератор, энергия от которого выдается в систему целым букетом вспомогательных и дополнительных узлов, в том числе обеспечивает разгрузку, хранение, приготовление и подачу на сжигание. Сюда входят железнодорожное хозяйство, вагоноопрокидывателя, тракты подачи топлива с узлами пересыпок, дробилками, бункерами, мельницами и пылесистемы. И перерабатывается угля сотни, а то и тысячи тонн в час. Уголь же рассыпается, самовоспламеняется, пылит, а пыль взрывается. Поэтому появляются системы пылеподавления, аспирации, гидросмыва с очистными сооружениями. Все эти дополнительные узлы увеличивают объемы и стоимость ТЭС, затрудняют работу эксплуатационного персонала, не обеспечивая стопроцентной гарантии безопасности и нормальных санитарно-гигиенических условий работы.*

**Ключевые слова:** ТЭС, энергия, уголь, SCADA Trace Mode, математическая модель.

**AUTOMATION OF THE TECHNOLOGICAL PROCESS FOR MANUFACTURE  
OF CALCULATED WATER-COAL FUEL**

*In this article a technological scheme of GDP production will be developed, a functional scheme of automation, a mathematical model for regulating the supply of coal dust. Use the SCADA Trace Mode software to create screen forms.*

*Taking into account the fact that coal is cheaper than fuel oil and gas, it is also necessary to imagine that combustion of coal at the TPP does not simply provide us with energy and it does not turn out to be very cheap, since the use of coal at the TPP determines the overgrowth of the main technological chain of the power plant: coal combustion in the furnace of the boiler and the steam, with the help of a turbine rotating an electric generator, the energy from which is issued to the system with a whole bunch of auxiliary and additional units, including provide unloading, storage, preparation and filing and burning. This includes the railway industry, carriages, fuel supply lines with intersections, crushers, bunkers, mills and pylostems. And coal is recycled hundreds, and even thousands of tons per hour. The charcoal is scattered, self-engulfing, sawing, and dust explodes. Therefore, there are systems of dust suppression, aspiration, water drainage with treatment facilities. All these additional nodes increase the volume and cost of construction of the TPP, complicate the work of the operating personnel, without providing a one hundred per cent safety guarantee and normal sanitary and hygienic conditions of work.*

**Key words:** thermal power station, energy, coal, SCADA Trace Mode, mathematical model.

УДК 004.925.83

**Вяткин С.И.**

Институт автоматизации и электрометрии СО РАН

**Павлов С.В.**

Винницкий национальный технический университет

**Романюк С.А.**

Винницкий национальный технический университет

## РЕЙКАСТИНГ ОБЪЕМНЫХ ДАННЫХ И ФУНКЦИОНАЛЬНО ЗАДАНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЛЯ МЕДИЦИНСКИХ ПРИЛОЖЕНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ГРАФИЧЕСКИХ УСКОРИТЕЛЕЙ

*Рейкастинг на основе GPU стал важным инструментом визуализации данных для медицинских изображений. Хотя метод и формирует высококачественные изображения, его основным недостатком является высокая вычислительная сложность.*

*В биомедицинской визуализации необходима визуализация 3D-наборов данных, полученных от КТ или МРТ-сканеров, в виде наглядного двумерного изображения в процессе, называемом объемным рендерингом.*

*В результате популярности и наглядности представления объемных данных появился широкий класс методов объемного рендеринга. Рейкастинг является одним из таких методов. Он позволяет производить высококачественный объемный рендеринг, но это ресурсоемкий метод, который при современных технологиях не обеспечивает интерактивность при визуализации больших наборов данных при обработке на центральном процессоре. Появление эффективных графических процессоров, доступных практически для всех современных рабочих станций, в сочетании с их высокой степенью программируемости открывает широкую область новых приложений для видеокарт. В этих приложениях используется рейкастинг, использующий внутренний параллелизм при обработке полностью независимых световых лучей, что позволяет использовать преимущества потоковой параллельной архитектуры графического процессора.*

*В статье предложен метод рейкастинга объемных данных и функционально заданных поверхностей, реализованный с применением графических ускорителей. В методе предусмотрена визуализация большого числа объемов, комплекс полупрозрачных и функционально заданных объектов, сложных полупрозрачных объемов, в том числе пересечений объемов в конструктивном твердотельном моделировании. Метод, включая стадию растеризации, реализован на CUDA, что позволяет полностью контролировать иерархию памяти, в частности доступ к высокой пропускной способности и низкое время ожидания распределенной памяти. Обеспечивается интерактивная частота кадров при одновременном отображении более ста произвольно перекрывающихся объемов.*

**Ключевые слова:** функционально заданные поверхности, объемный рендеринг, рей-кастинг, CSG, CUDA, GPU.

**Постановка проблемы.** Рейкастинг – самый распространенный подход для рендеринга объема благодаря своей гибкости при генерации изображения высокого качества [1–4]. Большой объем однородных данных, содержащихся в объемной модели, очень хорошо распараллеливается при вычислениях. Сегодня даже обычный графический процессор (GPU) способен отобразить один объем данных высокого разрешения с высокой частотой кадров с помощью программно-аппаратных шейдеров ускорителя.

Однако отображение одного однородного объема не подходит для многих приложений. Одно-

временный рендеринг нескольких объемов необходим при обработке нескольких наборов данных. В медицинской визуализации такие методы получения анатомических изображений, как компьютерная томография (КТ), магнитно-резонансная томография (МРТ), УЗИ, и методы получения функциональных изображений, например, позитронная эмиссионная томография (ПЭТ), однофотонная эмиссионная компьютерная томография, функциональная МРТ, используются для обследования пациента [5–9]. Кроме того, модели медицинских инструментов и совмещение поверхностей с объемными данными необходимы для



компьютерной хирургии. Виртуальные хирургические операции являются одними из наиболее перспективных направлений в медицине, в которых применяются трехмерная компьютерная графика и технологии виртуальной реальности. Системы виртуальной ортопедической хирургии, которые могут работать на общедоступных персональных компьютерах, становятся актуальными. Например, во время обучения общей ортопедической хирургии врачи исследуют переломы на пластических костях с помощью хирургических инструментов и имплантатов. Хирурги заинтересованы, во-первых, в экономии стоимости костей, так как синтетические кости хорошего качества стоят дорого; во-вторых, появляется возможность работать с нужными костями, которые могут быть недоступны на рынке в данный момент. Кроме того, полезной возможностью является исследование на виртуальных моделях реальных переломов, полученных из данных КТ или МРТ. Конечно, это виртуальное обучение не заменит полностью обязательного обучения на синтетических костях, но может позволить студентам выполнять начальную рутинную работу полностью в виртуальной среде, тем самым экономя расходы и время обычной подготовки. А также можно будет выполнить хирургическое планирование операции. Рендеринг нескольких объемов одновременно в композиции с поверхностями осуществить труднее, чем визуализацию отдельных объемов, так как требует обработки перекрытий объемов и смешивания цветов. Пересчет объемов в единой системе координат не желательно, так как это приводит к потере качества или увеличению требований к памяти. Обязательное требование в виртуальной хирургии – сочетание объемов с поверхностями. Функциональные модели хорошо подходят для встраивания посторонних объектов (инструментов, имплантатов и пр.) в объемные данные.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Метод рейкастинга [1–4] (англ. raycasting – бросание лучей) основывается на вычислении пересечения лучей, испускаемых камерой через проекционный экран, и примитивов сцены. Расстровое изображение строится на основе замеров пересечения лучей с визуализируемой поверхностью в пространстве

**Постановка задачи.** Цель статьи – разработать метод рейкастинга объемных данных и функционально заданных поверхностей, реализованный с применением графических ускорителей.

**Изложение основного материала исследования.** В основе рейкастинга стоит идея испускать

лучи из «глаз» наблюдателя, один луч на пиксель, и находить самый близкий объект, который блокирует путь распространения этого луча. Используя свойства материала и эффект света в сцене, алгоритм рейкастинга может определить затенение данного объекта. Предположение в упрощении основано на том, что если поверхность размещена перед светом, то свет достигнет поверхности и не будет заблокирован или находиться в тени. Затенение поверхности вычисляется с помощью алгоритмов затенения традиционной компьютерной трёхмерной графики. Одним из преимуществ рейкастинга является способность легко обрабатывать неплоские поверхности и сплошные тела. Если математическая поверхность может быть пересечена лучом, то ее изображение может быть получено с помощью рейкастинга. Сложные объекты могут быть созданы с использованием методов моделирования сплошных тел.

Для описания поверхностей часто используются функции отклонения (второго порядка) от базовой квадратики [10]. Поверхности строятся с помощью квадрата и представляются композицией базовой квадратики и возмущений:

$$F'(x, y, z) = F(x, y, z) + \sum_{i=1}^N f_i R_i(x, y, z), \quad (1)$$

Где  $f_i$  – форм-фактор;  $R(x, y, z)$  – возмущение:

$$R_i(x, y, z) = \begin{cases} Q_i^3(x, y, z), & \text{если } Q_i(x, y, z) \geq 0, \\ 0, & \text{если } Q_i(x, y, z) < 0, \end{cases} \quad (2)$$

где  $Q(x, y, z)$  – возмущающая квадратика.

Чтобы поверхность была гладкой, степень должна быть больше двух. Это условие гарантирует непрерывность функции и её производной.

Геометрическая модель создаёт условия для конструирования объектов и их композиций различной сложности. Для этого используется множество геометрических операций  $\Phi$ , определяемое математически следующим образом [11]:

$$F_j: M^1 + M^2 + \dots + M^n \rightarrow M. \quad (3)$$

Для формирования моделей сложных объектов на базе функций возмущения используются теоретико-множественные, осуществляемые с применением булевых операций объединения и пересечения. Бинарная операция (n=2) (3) объектов  $G_1$  и  $G_2$  означает операцию  $G_3 = F_j(G_1, G_2)$  с определением:

$$f_3 = \psi(f_1(X), f_2(X)) \geq 0, \quad (4)$$

где  $\psi$  – непрерывная вещественная функция двух переменных.

В работе представлен метод, направленный на разработку недорогой альтернативы обычному

ортопедическому хирургическому обучению и прочих медицинских приложений.

Рейкастинг объемных данных. Метод позволяет визуализировать несколько объемов в комбинации с функциональными поверхностями с применением сортировки по глубине всех фрагментов сцены [12; 13; 14] (рис. 1). Для этого применяется тайловая технология визуализации [15]. Суть ее заключается в следующем. Процесс растривания разбивается на два этапа. В общем случае первый этап заканчивается, когда рассматриваемой части соответствует клетка определенного размера (тайл-tile). Прimitives промежуточного описания являются фрагменты пересечения геометрических объектов с клетками. Второй этап вычислений – обработка списка объектов, определение видимости и цвета пикселей. Применяется рейкастинг изображения со сложными пересечениями объемных данных с поверхностями. Все вычисления выполняются на графическом акселераторе (GPU). Описание состоит из простого графика сцены.



**Рис. 1. Воксельные (ткани и кости) и функциональные (имплантаты) данные описания сцены**

Внутренние узлы дерева, связанные с операциями конструктивной твердотельной геометрии (CSG), ссылаются к объекту, а также к объемной текстуре и материалу с его свойствами. Экземпляры можно создавать, ссылаясь на тот же объект и/или объемную текстуру не один раз. Алгоритм рейкастинга лучей включает обычные шаги рендеринга: преобразование объекта, растеризация и обработка фрагментов. Обработка фрагментов выполняется в параллельно-пиксельном режиме для клеток 8x8 пикселей и отслеживает прохождение соседних лучей по объемам, представленным как 3D текстуры. Для этого также используется кэш когерентности текстур. Система рендеринга проходит сцену только один раз. Реализованы все шаги в программном обеспечении CUDA,

поэтому имеется доступ ко всем промежуточным результатам конвейера, которые хранятся в общей памяти для максимальной производительности. Реализованы два отдельных вычислительных конвейера (один для обработки объектов, а другой – для обработки фрагментов). Производится сортировка списка всех соответствующих фрагментов для каждого пикселя, которая завершается после обработки всех объектов. Вычислительный конвейер объектов отвечает за геометрические преобразования и определение принадлежности объектов клеткам. Пиксельный конвейер получает фрагменты в произвольном порядке. Далее они сортируются в Z-направлении, прежде чем они могут быть использованы. Окончательная трассировка лучей и затенение требуют смешивания нескольких пересекающихся объемных объектов и эффективного накопления отдельных объемных вкладов вдоль лучей. В обычном рендеринге сцен преобладают непрозрачные объекты. Высокая производительность определяется возможностью идентификации маскированных частей сцены в начале конвейера. В отличие от классического объемного подхода, предлагаемый метод рендеринга должен растривать все поверхности и передать информацию на экране покрытия поверхностей (маскирование) до обработки пикселей. После преобразования объекта в пространство экрана для каждой клетки (тайла) 8x8 пикселей вычисляется маска. Эта простая стратегия хорошо подходит для аппаратной технологии CUDA и предпочтительнее более сложных подходов. Для метода важно, чтобы каждый фрагмент, охватываемый границей объема, вычислялся один раз с момента инициализации. Поэтому вычисляются покрытые пиксели для каждой поверхности. Блок вычислений, ответственный за клетку, состоит из 64 вычислителей, один для каждого пикселя в тайле. Первая задача для вычислителя – построить представление луча, состоящего из пересечений с поверхностями, отсортированными по глубине. Вычислитель выполняет итерацию по списку поверхностей, записывает и проверяет свой бит в маске покрытия. Если бит установлен, то он вычисляет глубину пересечения с помощью уравнения поверхности. Z-значения и идентификаторы поверхности хранятся в виде массива в быстром доступе общей памяти. Поэтому выделяется только одно 32-разрядное значение каждой записи, 16-бит – на запись Z-значения и 16-бит для идентификатора поверхности. Записи в этом массиве чередуются, чтобы избежать конфликтов. Кроме того, имеется общая память 16 КБ, которая

разделяется на 64 слота, что позволяет каждому вычислителю сохранить максимум 63 записи. Это ограничивает максимальную глубину сложности 63. Массив поддерживается в сортированном порядке путем вставки новых значений в соответствующее положение, начиная с элементов, ближних к наблюдателю. Получается, что время, затраченное на сортировку, невелико по сравнению с последующим временем прохождения луча, даже для специально разработанного худшего сценария, в котором весь список фрагментов расположен в обратном порядке (т. е. имеет квадратичную временную сложность). Более того, благодаря пространственной когерентности для умеренно сложных сцен, операция вставки используется для многих потоков. Обоснование такого подхода состоит в том, что фрагменты, маскированные 63 более близкими слоями, будут иметь минимальное влияние на окончательное изображение и, следовательно, могут быть замаскированы. Чтобы проиллюстрировать это утверждение, протестированы аппроксимации на объектах с очень высокой глубинной сложностью. После сортировки пиксельный поток выполняет итерацию отсортированного массива в порядке от ближайшего до самого дальнего. Глубина интервала между двумя последовательными записями в массиве определяет однородный сегмент луча относительно пересекающихся объектов. Переходя по массиву, поддерживается информация о пересекающихся объектах сцены, которые являются листьями дерева конструктивной твердотельной геометрии (CSG). Если один или несколько объектов сцены пересекаются, начальная точка луча должна быть преобразована в координаты модели, образуя таким образом набор лучей пространства объекта. Для каждого пространства объекта луч должен использовать одинаковый размер шага в мировой системе координат, чтобы правильно смешивать образцы для каждого объекта сцены. Так как объекты сцены могут иметь различные размер и разрешение, используется минимальный размер шага всех объектов вдоль отрезка луча, чтобы гарантировать, отсутствие пропусков. Так как это

может привести к передискретизации разрешения объектов, обеспечивается вариант регулировки этого параметра. Пропуск пустого пространства является необходимым методом ускорения для объемной визуализации. Эффективная обработка граничной геометрии в нашем методе рендеринга позволяет пропускать внешнее и внутреннее пространство для ускорения вычислений. Это легко может быть достигнуто путем выполнения вычисления параллельно на GPU, тем самым избегая дополнительных медленных передач данных из памяти. Время вычислений для набора данных 5K составляет около одной миллисекунды на NVIDIA 470 GTX. Новые ограничивающие геометрические поверхности вставляются в глобальный список поверхностей в глобальной памяти GPU и связаны с соответствующими объектами сцены. Во время обхода луча с помощью сортированного списка фрагментов ограничивающие геометрические поверхности позволяют одновременно пропускать внутреннее пространство на основе набора активных объектов, который обновляется всякий раз, когда фрагмент граничной геометрии обрабатывается, при добавлении или удалении определенного объекта. Использование плотно прилегающей ограничительной геометрии увеличивает частоту кадров до 25%, в частности, при передаче функций, которые делают большие части объема прозрачными. В целом на оптимизацию влияют как ядро поверхностей, так и ядро обработки пикселей.

**Выводы.** За счет последних улучшений в многоядерных моделях программирования GPU разработан новый подход к визуализации множества объемов и геометрии. CUDA позволил разработать программный конвейер рендеринга, который выполняется параллельно. Такой подход актуален для широкого спектра применений. Это увеличивает практическую применимость объемного рендеринга к очень сложным сценам, включая пересекающиеся объемы и геометрию для медицинских приложений. Как показано в статье, метод является простым в реализации, надежным и адаптируется под конкретное применение.

#### Список литературы:

1. Yagel R., Machiraju R. Data Parallel Volume Rendering Algorithms. *The Visual Computer*. 1995. № 11 (6). P. 319–338.
2. Krueger J., Westermann J. Acceleration techniques for GPU-based volume rendering. *IEEE Visualization*. 2003. P. 287–292.
3. Volume Rendering / R.A Drebin, L. Carpenter, P. Hanrahan. *Computer Graphics*. 1988. № 22 (4). P. 65–74.
4. A Fast Display Method for Volumetric Data / L. Sobeirajski, D. Cohen, A. Kaufman, R. Yagel, D. Acker. *The Visual Computer*. 1993. № 10 (2). P. 116–124.

5. Herman G.T. Image Reconstruction from Projections. The Fundamentals of Computerized Tomography. Academic Press, 1980.
6. Accelerated Volume Rendering and Tomographic Reconstruction Using Texture Mapping Hardware / B. Cabral, N. Cam, J. Foran. Proceedings 1994 Symposium on Volume Visualization. P. 91–98.
7. A reproducible evaluation of ants similarity metric performance in brain image registration / B.B. Avants, N.J. Tustison, G. Song, P.A. Cook, A. Klein and J.C. Gee. Neuroimage. 2011. № 54 (3). P. 2033–2044.
8. Use of structural magnetic resonance imaging to predict who will get Alzheimer's disease / R.J. Killiany et al. Annals of neurology. 2000. № 47 (4). P. 430–439.
9. Multiresolution volume visualization with a texture-based octree / I. Boada, I. Navaza, R. Scopigno. The Visual Computer. 2001. № 17. P. 185–197.
10. Вяткин С.И. Моделирование сложных поверхностей с применением функций возмущения. Автометрия. 2007. Т. 43. № 3. С. 40–47.
11. Вяткин С.И. Преобразования функционально заданных форм. Программные системы и вычислительные методы. 2014. № 4. С. 484–499.
12. Everitt C. Interactive Order-Independent Transparency. Technical report NVIDIA OpenGL applications engineering, 2001.
13. Mammen A. Transparency and Antialiasing Algorithms Implemented with the Virtual Pixel Maps Technique. IEEE Computer Graphics Applications, pp. 43–55, 1989.
14. Porter T. and Duff T. Compositing Digital Images. Computer Graphics. 1984. Volume 18. Number 3 July. P. 253–259.
15. Вяткин С.И. Метод рекурсивного поиска элементов изображения функционально заданных поверхностей. Автометрия. 2017. Т. 53. № 3. С. 53–57.

#### **РЕЙКАСТИНГ ОБ'ЄМНИХ ДАНИХ І ФУНКЦІОНАЛЬНО ЗАДАНИХ ПОВЕРХОНЬ ДЛЯ МЕДИЧНИХ ДОДАТКІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ГРАФІЧНИХ ПРИСКОРЮВАЧІВ**

*Рейкастинг на основі GPU став важливим інструментом візуалізації даних для медичних зображень. Хоча метод і формує високоякісні зображення, його основним недоліком є висока обчислювальна складність.*

*У біомедичній візуалізації необхідно відображати 3D-набори даних, отриманих від КТ або МРТ-сканерів, у вигляді наочного двовимірного зображення в процесі, який називають об'ємним рендерингом.*

*За рахунок популярності й наочності подання об'ємних даних з'явився широкий клас методів об'ємного рендеринга. Рейкастинг є одним із таких методів. Він дає змогу реалізувати високоякісний об'ємний рендеринг, але це ресурсоємний метод, який за сучасних технологій не забезпечує інтерактивності під час візуалізації великих наборів даних у процесі обробки на центральному процесорі. Поява ефективних графічних процесорів, доступних практично для всіх сучасних робочих станцій, у поєднанні з їх високим ступенем програмованості відкриває широку ділянку нових додатків для відеокарт. У цих додатках використовується рейкастинг, що застосовує внутрішній паралелізм під час обробки повністю незалежних світлових променів, що дає змогу використовувати переваги потокової паралельної архітектури графічного процесора.*

*У статті запропоновано метод рейкастингу об'ємних даних і функціонально заданих поверхонь, реалізований із застосуванням графічних прискорювачів. У методі передбачена візуалізація великого числа об'єктів, комплекс напівпрозорих і функціонально заданих об'єктів, складних напівпрозорих об'єктів, у тому числі перетинів об'єктів у конструктивному твердотільному моделюванні. Метод, включаючи стадію растеризації, реалізовано на CUDA, що дає змогу повністю контролювати ієрархію пам'яті, зокрема доступ до високої пропускну здатності й низький час очікування розподіленої пам'яті.*

*Забезпечується інтерактивна частота кадрів при одночасному відображенні понад ста об'єктів, що доволіно перекриваються.*

**Ключові слова:** функціонально задані поверхні, об'ємний рендеринг, рейкастинг, CSG, CUDA, GPU.

#### **RAY CASTING OF VOLUME DATA AND FUNCTIONALLY SURFACED SURFACES FOR MEDICAL APPLICATIONS WITH APPLICATION OF GRAPHIC ACCELERATORS**

*Medical image three-dimensional reconstruction technology has been widely used in medical diagnosis and treatment planning.*

*GPU based ray casting has become a valuable tool for the visualization of medical image data. While the method produces highquality images, its main drawback is the high computational load.*

*In biomedical imaging, it might be necessary to visualize 3D datasets obtained from CT or MRI scanners as a meaningful 2D image, in a process called volume rendering. As a result of the popularity and usefulness of volume data, a broad class of volume rendering techniques has emerged. Ray casting is one of these techniques. It allows for high quality volume rendering, but is a computationally expensive technique which, with current technology, lacks interactivity when visualizing large datasets, if processed on the CPU. The advent of efficient GPUs, available on almost every modern workstations, combined with their high degree of programmability opens up a wide field of new applications for the graphics cards. Ray casting is among these applications, exhibiting an intrinsic parallelism, in the form of completely independent light rays, which allows to take advantage of the massively parallel architecture of the GPU. This paper describes the implementation and analysis of a set of shaders which allow interactive volume rendering on the GPU by resorting to ray casting techniques.*

*A method is proposed for the ray-casting of volumetric data and functionally defined surfaces using graphic accelerators. The method provides for visualization of a large number of volumes, a complex of translucent and functionally defined objects, complex translucent volumes, including intersections of volumes in constructive solid modeling. The method, including the rasterization stage, is implemented on CUDA, which allows to fully control the memory hierarchy, in particular, access to high bandwidth and low latency of distributed memory. An interactive frame rate is provided with simultaneous display of more than 100 arbitrarily overlapping volumes.*

*The proposed method can be used for realistic visualization of medical data.*

**Key words:** *functionally defined surfaces, volumetric rendering, ray-casting, CSG, CUDA, GPU.*

*Дмитришин С.С.*

Одеський національний політехнічний університет

*Давидов В.О.*

Одеський національний політехнічний університет

## ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ГОРІННЯ ВУГЛЕВОДНИХ ГАЗІВ У ПАРОГЕНЕРУЮЧИХ УСТАНОВКАХ ЗА РАХУНОК ЗМІНИ ВІДНОШЕННЯ ПАЛЬНЕ/ПОВІТРЯ

*Стаття спрямована на вирішення наукового завдання, що полягає в підтримці оптимального співвідношення під час спалювання в повітрі вуглеводневого газу невідомого складу за рахунок пошуку максимальної температури горіння при забезпеченні заданих характеристик факела полум'я в разі зміни поточної витрати повітря.*

*Одним із завдань персоналу є підтримка оптимального режиму котла за цих умов його роботи, що відповідає максимально можливому значенню ККД котла нетто. У зв'язку із цим виникає необхідність визначення впливу статичних характеристик котла – навантаження, температури живильної води, повітряного режиму топки й характеристики палива – на показники його роботи в разі зміни значень перерахованих параметрів.*

*Для вирішення сформульованого завдання необхідно визначити статичні та динамічні характеристики об'єкта керування. Також потрібно розробити математичну модель об'єкта керування, модель визначення умовної формули вуглеводневого палива за вимірними витратами повітря та вуглеводневого газу й температури полум'я та методи реалізації його ефективного спалювання в парогенеруючому обладнанні за рахунок зміни співвідношення паливо-повітря з метою забезпечення максимальної ефективності.*

**Ключові слова:** *теплова електростанція, паровий котел, автоматизація, математична модель, передавальна функція.*

**Постановка проблеми.** В основі сучасного інноваційного суспільства лежить забезпечення його паливно-енергетичними ресурсами (ПЕР), ефективність отримання й перетворення яких впливає на кінцеву енергоємність національного доходу.

Поточні значення питомих енергетичних показників сукупного національного доходу України в разі перевищують аналогічні показники країн Євросоюзу. Причина такого стану визначається не тільки технологічною відсталістю паливно-енергетичного комплексу та житлово-комунального сектора національної економіки, а й орієнтуванням усієї економіки України на неінноваційні ринки.

Звичайно, низка підприємств нафтопереробної та металургійної промисловості прагне замінити природний газ власними несертифікованими газами, які утворюються під час переробки сировини для власного енергозабезпечення. На цих підприємствах часто утворюються нерегулярні надлишки таких газів, які, як правило, утилізуються неефективно. Доцільно було б такі вторинні енергоресурси використовувати з максимальною ефективністю для вироблення промислового пара

іншими підприємствами або електричної енергії на теплових електростанціях.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У роботах [1, с. 17; 2, с. 259] проводиться аналіз впливу викидів заводів, що займаються спалюванням природного газу.

У праці [3, с. 83] розглянута модель спалювання природного газу, мазуту, а також несертифікованого газу, при цьому прийнято реконструювати теплообмінник у вертикальне положення, а також вихідні димові гази розділити на два потоки, один із яких веде назад у паровий котел.

**Постановка завдання.** Метою роботи є розробка моделей і методів підвищення ефективності процесів горіння вуглеводневих газів змінного складу в камерах згоряння за рахунок постійної зміни відношення пальне/повітря для отримання максимальної температури факела в камері згоряння парогенеруючих установок.

Досягнення мети здійснюється вирішенням таких дослідницьких завдань:

– аналіз способів отримання вуглеводневих газів змінного складу й особливостей їх спалювання в парогенеруючих установках;

– розробка імітаційної моделі спалювання вуглеводневих газів змінного складу в камерах згоряння, вихідними величинами якої є виміряні технологічні параметри: температура факела й витрати пального та окислювача;

– розробка методу й моделі забезпечення сталості заданих характеристик генерації пари в разі зміни в часі якісного складу вуглеводневого газу;

– упровадження методу й моделей для визначення ефективності реальних енергоустановок.

#### Виклад основного матеріалу дослідження.

На підприємствах нафтопереробки технологією поділу нагрітої в печах сировини в ректифікаційних колонах передбачено використання пари. Для цих цілей на виробничому майданчику, крім технологічних установок, розміщують парові котли для його генерації. Генерація пари здійснюється при пускових операціях нафтопереробки за рахунок сертифікованого природного газу, теплотворна здатність якого становить 35,83 МДж/кг. Надалі під час пуску всіх технологічних установок у процесі виробництва світлих нафтопродуктів утворюється надлишок вуглеводневих газів. Частково ці гази використовуються в печах установок для розігріву сировини й повною мірою для забезпечення генерації пари.

Під час режимної наладки парових котлів основною вимогою є популярність і сталість теплотворної здатності. У низці випадків шляхом організації відбору технологічних газів від окремих установок це вдається. У загальному випадку всі технологічні установки скидають отримані гази в різні заводські колектори, звідки споживачі-установки його використовують для теплоенергетичних потреб. Так як технологічні установки, що виробляють нафтопродукти, працюють у різних змінних режимах, у заводських газових колекторах неможливо отримати газ постійного складу, а отже, постійної теплотворної здатності. Особливо це виявляється при появі водневмісних газів при малих щільностях. А це, як наслідок, не дає можливості забезпечити генерацію пари при дотриманні екологічних норм на викиди й погіршує економічну доцільність виробництва пари.

Для моделювання процесу генерації пари розглянемо три парові котли типу ГМ-50 з реальною продуктивністю пара по 50 т/год., що працюють на один паропровід, з використанням вуглеводневого газу (рис. 1). Розробимо модель котлів, що подають пар в один паровий колектор, при їх газопостачанні несертифікованими газами з граничними характеристиками, які можуть випадковим чином змінюватися в часі.

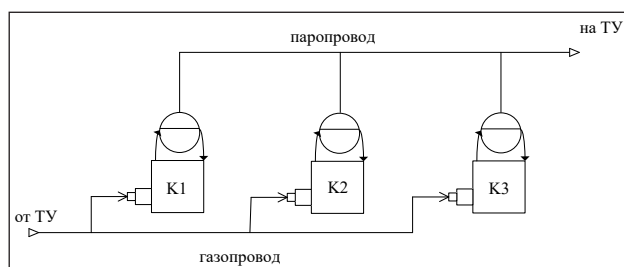


Рис. 1. Схема установки котлів, що працюють на один паропровід

За попередньою оцінкою, під час роботи одного котла тепловиділення  $Q_f$  (тут і далі позначення) в топці для двох несертифікованих газів становили:

– для вуглеводневого газу зі щільністю 1,884 кг/м<sup>3</sup> і теплотворною здатністю 46,31 МДж/кг паропровід 52 МВт;

– для водневмісного газу зі щільністю 0,718 кг/м<sup>3</sup> і теплотворною здатністю 78,27 МДж/кг паропровід 7,96 МВт.

Для метану СН<sub>4</sub>, щільність якого 0,7168 кг/м<sup>3</sup> і теплотворна здатність 35,83 МДж/кг, тепловиділення в топці становитиме 14,84 МВт. Для отримання моделі об'єкта його розбили на ділянки по каналах «витрата живильної води – рівень», «витрата пари – рівень», а також «температура живильної води – рівень» і «теплосприйняття екранів – рівень» [4, с. 50]. Питання спалювання газів, отриманих від промислових установок, або, як їх можна назвати, несертифікованих газів відкрите не тільки в нафтопереробній промисловості, а й на промислових печах. У роботі показано, що використання такого роду газів дає змогу заощадити витрати на сертифіковане паливо – природний газ – та уникнути його надмірного використання. Також варто зауважити, що спалювання водневмісного газу сприяє зниженню викидів СО<sub>2</sub> в навколишнє середовище. Отже, порушується й екологічний момент. Математична модель розбита на 6 ділянок, показаних на рис. 2, для зручності сприйняття. Кожна ділянка пронумерована. Вихідні дані однієї ділянки є вхідними для іншої. Кожна ділянка описана диференціальним рівнянням. Як буде показано далі, деякі ділянки будуть описані двома диференціальними рівняннями. Ділянки 1 і 2 описують диференціальні рівняння, що належать до радіаційної та конвективної поверхонь нагріву. Ділянки 1' і 2' описують допоміжні диференціальні рівняння, що зв'язують вхідні дані в модель із виділенням тепла шляхом радіації й конвекції. Ділянка 3 описує процеси, що протікають в барабані рівня в котлі. Ділянка 4 описує трубопровід.

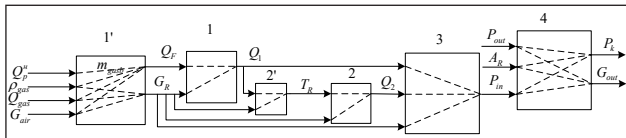


Рис. 2. Схема ділянок парового котла

В основу моделі покладено закони збереження енергії і мас.

$$\sum Q_i = \sum Q_{out_i}, \quad (1)$$

де  $Q_i$ ,  $Q_{out_i}$  – кількість підведеної та відведеної енергії в системі за одиницю часу, Вт.

$$G_{in} = G_{out}, \quad (2)$$

де  $G_{in}$ ,  $G_{out}$  – кількість речовини на вході й виході розглянутої ділянки, кг/с.

Допущення, прийняті для математичної моделі:

– склад, який змінюється, вуглеводневого палива, що призводить до зміни нижчої теплотворної здатності палива  $Q_p^u$ , МДж/кг і густини  $\rho_{gas}$ , кг/м<sup>3</sup>, визначає витрату газу щодо співвідношення:

$$G_{gas} = Q_p^u \cdot \rho_{gas}, \quad (3)$$

де  $G_{gas}$  – масова витрата палива, кг/с;

– рішення нелінійного рівняння в тимчасовій ділянці здійснюється його лінеаризацією при малих збільшеннях.

Розглянемо ділянку 3 (рис. 2), що описує барабан котла. Аналіз схеми показав, що на вході барабана котла враховуються такі характеристики: витрата пару, теплота, отримана шляхом теплообміну радіаційними й конвективними поверхнями. Виходячи із цього, варто прийняти припущення, а саме: рівень води в барабані котла підтримується за рахунок керування подачею живильної води трьохімпульсним регулятором рівня. Також передбачається, що регулятор рівня компенсує зменшення рівня води в барабані котла за рахунок зміни витрати води з барабана котла з безперервною і періодичною продувкою. Вплив зміни ентальпій живильної води внаслідок зміни її витрати регулятором рівня впливає на величину генерації пари в барабані котла, і, як наслідок, тиск насиченої пари дуже малий порівняно з впливом на генерацію пари тиску в барабані котла й порівняно з тепловідленнями в котельній камері.

Розглянемо парові установки, по якій протікає стисливе середовище – газ (пар). Повна модель процесів, що протікають у стисливій рідині, задіє рівняння термодинаміки, досить складні з математичного погляду. Тому для аналізу паросилової установки прийнято використовувати наближену модель. Уведемо такі припущення: наявні зміни тиску зумовлено тертям у трубопроводах,

дроселюванням у регулюючих клапанах, а також стисненням або розширенням у машинах, що працюють за принципом закінчення. Також варто врахувати, що в разі зміни тиску змінюється щільність середовища, а, отже, і її обсяг.

При постійному входному й вихідному тиску системи їх збільшення дорівнюють нулю.

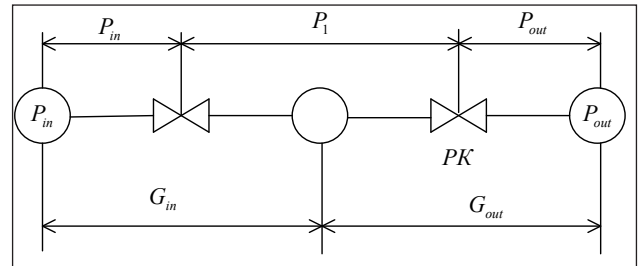


Рис. 3. Графічна ілюстрація зміни тиску в паропроводі, де  $P_{in}$  – тиск у барабані котла, Па;  $P_1$  – тиск на виході з котла, Па;  $P_{out}$  – тиск у паропроводі, Па

У процесі роботи котла на загальну парову магістраль істотним є не тиск вологої пари  $\Delta P_l$  усередині пароводяного тракту, а тиск перегрітої пари  $\Delta P_M$  у паропроводі. Вхідними параметрами для моделі ділянки паропроводу є тиск на вході  $\varnothing P_{номп}$ , тиск від споживачів і на виході  $\Delta P_p$  з паропроводу, ступінь відкриття регулюючого клапана  $\Delta \phi_D$ .

Іншим вихідним параметром, зміну якого в перехідному процесі необхідно знайти, є витрата пари в паропроводі  $\Delta G_p$ . Визначається сумою витрат пару з кожного котла.  $\Delta G_p = \sum G_{ki}$ , де  $G_{ki}$  – витрата пари на виході з котла.

Використовуючи [5, с. 57; 6, с. 93], розраховували коефіцієнти при диференціальних рівняннях і промоделивали модель у середовищі MatLab. На рис. 4–6 представлені графіки зміни витрати пари у відхиленнях на виході одного котла при збуренні теплотворною здатністю газу. З графіків видно, що при 10% роботі одного котла паропроductивність котлів при різних складах газів значно відрізняється. У процентних співвідношеннях відносно відхилення паропроductивності газів для 1 несертифікованого палива становить на 43% менше еталонного, для другого – на 193% більше, сертифікований газ прийнятий як еталонний.

Отже, під час роботи трьох котлів продуктивність пару зростає. Для підтримки заданої продуктивності пари навантаження котлів для газів буде різним. Для отримання продуктивності парт 25 т/год. для сертифікованого палива необхідно задіяти один котел продуктивністю 50 т/год. на потужність в 50%.



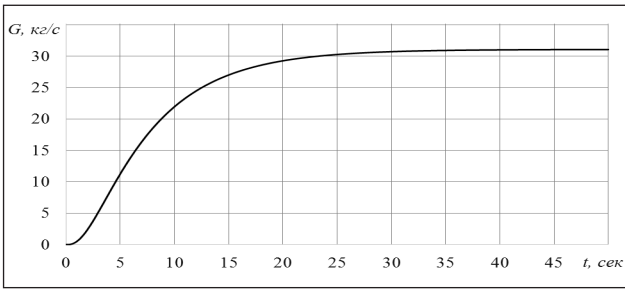


Рис. 4. Графік зміни збільшення витрати пари при збуренні теплотворної здатності газу в 10% (для сертифікованого палива)

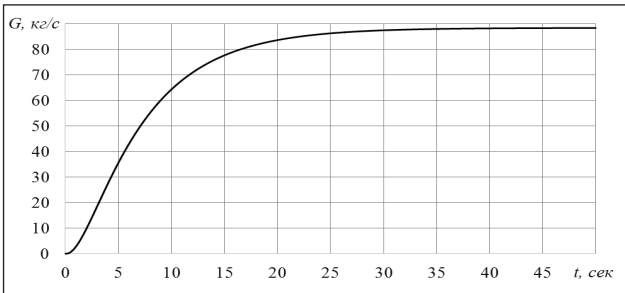


Рис. 5. Графік зміни збільшення витрати пари при збуренні теплотворної здатності газу в 10% (для несертифікованого вуглецевого палива)

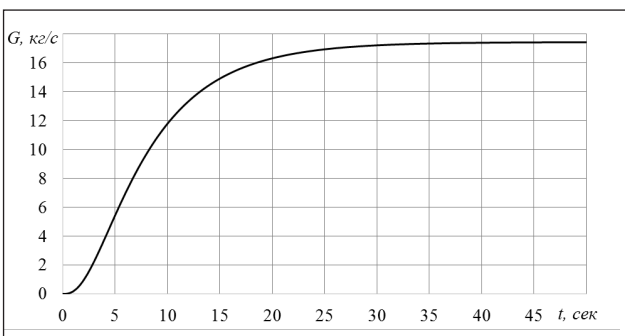


Рис. 6. Графік зміни збільшення витрати пари при збуренні теплотворної здатності газу в 10% (для несертифікованого водневмісного палива)

Для несертифікованого вуглеводневого палива необхідно задіяти два котли продуктивністю 50 т/год. на 20% навантаженні. Для несертифікованого водневмісного газу – два котли продуктивністю 50 т/год. на повну потужність та один котел продуктивністю 50 т/год. на 30% навантаження.

Отже, для вироблення заданої кількості пару необхідно автоматизувати процес перемикання потужності котлів, при цьому аналізувати склад газу.

Для ілюстрації алгоритму визначення оптимального відношення паливе/повітря під час спалювання вуглеводневого газу, склад якого довільно змінюється в часі, необхідно підготувати дані. Ілюстрацію здійсимо на прикладі випад-

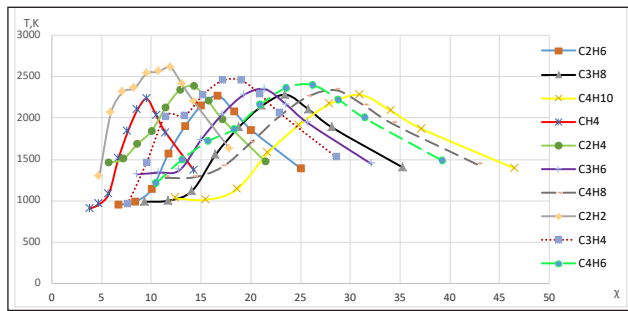
кової зміни в часі складу газу, який знаходиться в газовій магістралі й надходить на спалювання в промисловий барабанний котел. Припустимо, що в газовій магістралі випадковим чином може перебувати група вуглеводних газів  $C_nH_{2n-2}$ ,  $C_nH_{2n}$ ,  $C_nH_{2n+2}$ . На основі моделі прямої задачі розраховані максимальна температура  $T$ , парціальні тиски  $PCO$  і  $PNO$  при спалюванні одного пального в повітрі залежно від  $\chi$ -мольного коефіцієнта співвідношення компонентів  $i$ , як наслідок, коефіцієнт надлишку повітря  $\alpha$ .

На основі отриманих табличних даних побудовані залежності температури горіння одного моля пального кожного з розглянутих газів від кількості молей повітря, що надходять для його окислення (рис. 7). У кожній залежності однозначно ідентифікується максимум температури полум'я, що повністю відповідає теоретичним і практичним результатам. Максимум температури відповідає відповідному мольному стехіометричному коефіцієнту співвідношення компонентів або коефіцієнту надлишку повітря  $\alpha = 1$ . Зменшення практично до нуля парціального тиску  $CO$  при збільшенні коефіцієнта надлишку повітря відповідає дійсності. Так само адекватно обчислено наявність максимуму парціального тиску  $NO$ . Зменшення кількості утворення  $NO$  пов'язано зі зменшенням температури горіння.

Позначимо через  $\dot{V}_{ок}$ ,  $\dot{V}_Г$  – об'ємні витрати окислювача (повітря) й горючих газів відповідно. Для реалізації запропонованого алгоритму потрібно таке технічне забезпечення. Необхідна можливість вимірювань температури горіння газів, об'ємних витрат повітря й горючих газів. Крім того, необхідна можливість зміни витрат повітря й горючих газів, що надходять у котел. Алгоритм визначення оптимального відношення паливе/повітря при спалюванні вуглеводневого газу, склад якого довільно змінюється в часі.

Крок 1. На інтервалі часу  $\Delta\tau$  вимірюється температура  $T$  й усереднюється її значення. Вимірювання температури здійснюється за фіксованих поточних  $i$ -х значеннях  $\dot{V}_{окi}$  і  $\dot{V}_{Gi}$ .

Крок 2. При фіксованому значенні  $\dot{V}_{Gi}$  відбувається зміна  $\dot{V}_{окi}$  на величину  $\delta\dot{V}_{ок}$ . Вимірюється нове значення температури  $T(\dot{V}_{окi} + \delta\dot{V}_{ок})$  і визначається характер монотонності на розглянутому інтервалі зміни об'ємної витрати повітря. Якщо  $T(\dot{V}_{окi}) > T(\dot{V}_{окi} + \delta\dot{V}_{ок})$ , то температура  $T$  убуває на цьому інтервалі, у разі  $T(\dot{V}_{окi}) < T(\dot{V}_{окi} + \delta\dot{V}_{ок})$  вона зростає. Крок 2 здійснюється до тих пір, поки подальша  $i+1$  зміна  $\delta\dot{V}_{ок}$  не призведе до зміни характеру монотонності на протилежний.



**Рис. 7. Залежність зміни температури горіння  $T$  від відношення об'ємних витрат повітря/горюче  $\dot{V}_{ок} / \dot{V}_г$**

Крок 3. Змінюється знак збільшення  $\delta \dot{V}_{ок}$  на протилежний і здійснюється перехід на крок 1. У такому пошуковому режимі в нескінченному тимчасовому циклі розглянутий алгоритм визначає ділянку поточного екстремуму. Якісна зміна складу газу в процесі горіння призводить до пошуку ділянки нового екстремуму. По-перше, принципово нова околиця екстремуму значення

температури  $T$  може знаходитися як вище, так і нижче за поточну зону, по-друге, за значенням об'ємної витрати повітря  $\dot{V}_{ок}$  — як зліва, так і праворуч від неї.

**Висновки.** Вирішення завдання максимального забезпечення ефективності і неперевикнення екологічних норм в умовах постійної зміни якісного складу палива вимагає впровадження нових розрахункових методів і моделей. Для визначення динамічних характеристик енергетичного парогенеруючого обладнання набула подальшого розвитку математична модель. Модель складається з рівнянь матеріального й теплового балансів, законів конвективного та променистого теплообміну і властивостей стиснутого газоподібного середовища. Для забезпечення заданого парового навантаження запропоновано метод, який базується на математичних моделях обчислення умовної формули газоподібного вуглеводневого палива й визначення динамічних характеристик парогенеруючої установки.

#### Список літератури:

1. Davoudia M. The major sources of gas flaring and air contamination in the natural gas processing plants. Journal of Natural Gas Science and Engineering. 2013. Vol. 13. P. 7–19.
2. Niels Berghout Machteld van den Broek, André Faaij. Techno-economic performance and challenges of applying CO2 capture in the industry : A case study of five industrial plants. International Journal of Greenhouse Gas Control. 2013. Vol. 17. P. 259–279.
3. Liu Hong, Peiwen Li, Kai Wang. Optimization of PEM fuel cell flow channel dimensions—Mathematic modeling analysis and experimental verification. International Journal of Hydrogen Energy. 2013. Vol. 38 (23). P. 9835–9846.
4. Tucakovica Dragan Possibilities for reconstruction of existing steam boilers for the purpose of using exhaust gases from 14 MW or 17 MW gas turbine. Applied Thermal Engineering. 2013. Vol. 56 (1–2). P. 83–90.
5. Rusinowski Henryk, Wojciech Stanek. Hybrid model of steam boiler. Energy. 2010. Vol. 35 (2). P. 1107–1113.
6. Вужак Janusz. Optimal control of energy losses in multi-boiler steam systems. Energy. 2009. Vol. 34 (9). P. 1260–1270.
7. Новиков О.Н. Энергоэкологическая оптимизация сжигания топлива в котлах и печах регулированием соотношения «топливо-воздух». Промышленная энергетика. 2000. № 5. С. 57–60.
8. Александров В.П. Паровые котлы малой и средней мощности. Москва, 1972. 200 с.
9. Вукалович М.П. Термодинамические свойства воды и водяного пара. Москва, 1955. 93 с.

#### ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГОРЕНИЯ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ГАЗОВ В ПАРОГЕНЕРИРУЮЩИХ УСТАНОВКАХ ЗА СЧЁТ ИЗМЕНЕНИЯ ОТНОШЕНИЯ ТОПЛИВО/ВОЗДУХ

*Статья направлена на решение научной задачи, которая заключается в поддержании оптимального соотношения при сжигании в воздухе углеводородного газа неизвестного состава за счет поиска максимальной температуры горения при обеспечении заданных характеристик факела пламени при изменении текущего расхода воздуха.*

*Одной из задач персонала является поддержание оптимального режима котла при данных условиях его работы, соответствующей максимально возможному значению КПД котла нетто. В связи с этим возникает необходимость определения влияния статических характеристик котла – нагрузки, температуры питательной воды, воздушного режима топки и характеристики топлива – на показатели его работы при изменении значений перечисленных параметров.*

*Для решения сформулированной задачи необходимо определить статические и динамические характеристики объекта управления. Также необходимо разработать математическую модель объекта*

управления, модели определения условной формулы углеводородного топлива по измеренным расходам воздуха и углеводородного газа и температуры пламени и методы реализации его эффективного сжигания в парогенерирующем оборудовании за счет изменения соотношения топливо-воздух с целью обеспечения максимальной эффективности.

**Ключевые слова:** тепловая электростанция, паровой котел, автоматизация, математическая модель, передаточная функция.

#### **ENHANCEMENT OF THE EFFICIENCY OF BURNING CARBOHYDRATED GASES IN POROGENERATOR INSTALLATIONS AT THE RATES OF REFRACTION OF THE FUEL/AIR**

*This article is aimed at solving a scientific problem, which is to support the optimal ratio when burning in the air of an unknown gas by hydrocarbon gas due to the search for the maximum combustion temperature while providing the given characteristics of the flame when changing the current flow of air.*

*One of the tasks of the personnel is to support the optimal mode of the boiler under the conditions of its operation, which corresponds to the maximum possible value of the efficiency of the boiler net. In connection with this, it is necessary to determine the influence of the static characteristics of the boiler – load, feed water temperature, air mode of the furnace and fuel characteristics – on its performance indicators when changing the values of the listed parameters.*

*To solve the formulated problem, it is necessary to determine the static and dynamic characteristics of the object of management. It is also necessary to develop a mathematical model of the control object and a model for determining the conditional formula of hydrocarbon fuel by measured air and hydrocarbon gas and flue temperature and methods for implementing its efficient combustion in steam generating equipment by changing the fuel/air ratio to ensure maximum efficiency.*

**Key words:** thermal power station, steam boiler, automation, mathematical model, transfer function.

*Дуба І.Е.*

Одеський національний політехнічний університет

## СУЧАСНА ЦИФРОВА БАГАТОЗВ'ЯЗНА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ОСНОВНИМ КОНТУРОМ – ПОЛОЖЕННЯ ПЛАЗМОВОГО ШНУРА – УСТАНОВКИ ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗУ ТОКАМАК

*ТОКАМАК – пристрій для здійснення реакції термоядерного синтезу в гарячій плазмі в квазістаціонарному режимі, причому плазма створюється в тороїдальній камері і її стабілізує магнітне поле. Призначення установки – перетворення внутрішньоядерної енергії в теплову й далі в електричну. Саме слово «ТОКАМАК» є аббревіатурою від назви «тороїдальна камера магнітна», проте творці установки замінили наприкінці «г» на «к», щоб не викликати асоціацій з чимось магічним.*

*Атомну енергію (і в реакторі, і в бомбі) людина отримує, розділяючи ядра важких елементів на більш легкі. Енергія, яка припадає на нуклон, максимальна для заліза (так званий «залізний максимум»), а так як максимум посередині, то енергія буде виділятися не тільки під час розпаду важких, а й під час з'єднання легких елементів. Цей процес називається термоядерним синтезом, він відбувається у водневій бомбі й термоядерному реакторі. Термоядерних реакцій, реакцій синтезу, відомо багато. Джерелом енергії можуть бути ті, для яких є недороге паливо, причому можливі два принципово різні шляхи запуску реакції синтезу.*

**Ключові слова:** ТОКАМАК, атомна енергія, математична модель, перехідний процес, плазмовий шнур.

**Постановка проблеми.** Сучасна цифрова багатозв'язна система управління основним контуром – положенням плазмового шнура-установки термоядерного синтезу ТОКАМАК. Відомо, що сталість положення шнура визначає надійність функціонування всієї установки. При сучасному розвитку техніки автоматизації й математичного моделювання управлінням конфігурації магнітного поля вдалося збільшити стійкість положення плазми до можливості технічної реалізації.

З іншого боку, ТОКАМАК не виділяє ніяких шкідливих речовин – ні хімічних, ні радіоактивних. Але що станеться, якщо все-таки плазма витече з реактора? Ясно, що в разі аварії ТОКАМАК набагато менш небезпечний, ніж атомний реактор, і не набагато небезпечніший, ніж станція на вугіллі.

По-перше, атомний реактор містить у собі запас пального на роки нормальної роботи. Це великий плюс для підводного човна або космічного польоту, але це ж створює принципову можливість великої аварії. У ТОКАМАК запасу «пального» немає.

По-друге, оскільки під час реакції синтезу виділяється більше енергії, то при рівній потужності самі кількості речовин будуть меншими: плазма в ТОКАМАК «важить» менше ніж сто грамів, а скільки важить активна зона реактора?

І нарешті, використаний у ТОКАМАК тритій має маленький період напіврозпаду й сам по собі не отруйний.

Отже, можна сподіватися, що досягнута висока надійність технологічного обладнання, висока надійність засобів автоматизації та висока якість керування передусім положенням плазмового шнура дасть змогу перейти від експериментів до промислового використання термоядерної енергії. При цьому, можливо, вигідніше за все будувати невеликі установки, які б за рахунок високої надійності обладнання гарантовано окупалися. А можливий витік плазми за періодом окупності не має великого значення: поряд можна побудувати нову, більш сучасну установку.

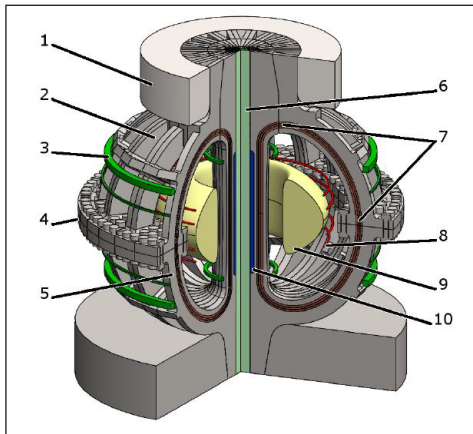
**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Дослідження щодо установок ТОКАМАК проводяться досить давно. Сьогодні експлуатація установок неможлива, проте спроби досягнути використання ТОКАМАК як альтернативного виду енергії проводяться.

Дослідження ТОКАМАК проводились в обмеженій кількості робіт.

Так, математична модель ТОКАМАК розглянута в роботі А.А. Стопакевич [1, с. 62–65]. У працях Д.В. Орлинського [2, с. 32–36] та Л.Е. Захарова, В.Д. Шафранова [3, с. 79–84] показані основні характеристики плазми.

**Постановка завдання.** Керування та застосування системи установки термоядерного синтезу ТОКАМАК.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Зовнішній вигляд ТОКАМАК показаний на рис. 1.



**Рис. 1. Зовнішній вигляд ТОКАМАК:**

1. Силоне кільце; 2. Силкові тороїдальні ребра;
3. Полоїдальна надпровідна котушка. 4. Роз'єм тороїдальних ребер і котушок; 7. Тороїдальний провідник; 8. Коригувальні полоїдальні котушки;
9. Плазмовий об'єм; 10. Центральний індуктор

Атомну енергію (і в реакторі, і в бомбі) людина отримує, розділяючи ядра важких елементів на більш легкі. Енергія, яка припадає на нуклон, максимальна для заліза (так званий «залізний максимум»), а так як максимум посередині, то енергія буде виділятися не тільки під час розпаду важких, а й під час з'єднання легких елементів. Цей процес називається термоядерним синтезом, він відбувається у водневій бомбі й термоядерному реакторі. Термоядерних реакцій, реакцій синтезу, відомо багато. Джерелом енергії можуть бути ті, для яких є недороге паливо, причому можливі два принципово різні шляхи запуску реакції синтезу.

Перший шлях – «вибуховий»: частина енергії витрачається на те, щоб привести в необхідний початковий стан дуже невелику кількість речовини, відбувається реакція синтезу, енергія, що виділилася, перетворюється в зручну форму. Власне, це воднева бомба, тільки вагою в міліграм. Як джерело вихідної енергії використовувати атомну бомбу не можна, вона не буває «маленькою». Тому передбачалося, що міліметрова таблетка з дейтерій-тритієвого льоду (або скляна сфера зі стислою сумішшю дейтерію і тритію) буде опромінюватися з усіх боків лазерними імпульсами. Щільність енергії на поверхні повинна бути при цьому такою, щоб верхній шар таблетки, що перетворився в плазму, виявився нагрітий до температури, при якій тиск на внутрішні шари й сам нагрів внутрішніх шарів таблетки стануть достатніми для реакції синтезу. При цьому імпульс має бути настільки коротким, щоб речовина, що перетворилася за наносекунду в плазму з температурою в десять мільйонів градусів, не встигала розлетітися, а давила на вну-

трішню частину таблетки. Ця внутрішня частина стискається до щільності, в сто разів більшої, ніж щільність твердих тіл, і нагрівається до ста мільйонів градусів.

Другий шлях: вихідні речовини можна нагріти відносно повільно – вони перетворяться в плазму, а потім к неї можна будь-яким способом вводити енергію, аж до досягнення умов початку реакції. Для протікання термоядерної реакції в суміші дейтерію з тритієм та отримання позитивного виходу енергії (коли енергія, що виділилася в результаті термоядерної реакції, виявиться більшою за енергію, витрачену на здійснення цієї реакції) потрібно створити плазму зі щільністю хоча б  $10^{14}$  частинок/см<sup>3</sup> (10–5 атм.) і нагріти її приблизно до 109 градусів, при цьому плазма стає повністю іонізованою.

Конструкція. Пристрій виглядає так: тороїдальна камера надягнута на сердечник трансформатора, плазма в камері є, по суті, обмоткою трансформатора. З камери відкачують атмосферне повітря, а потім напускають суміш газів, що містять ті атоми, які братимуть участь у синтезі. Потім по первинній обмотці трансформатора пропускають імпульс струму, достатній для того, щоб у вторинній «обмотці» (тобто в газі) стався пробій і почав текти струм. Під час протікання струму плазма нагрівається, але одним цим методом не вдається її нагріти вище за 20 млн. градусів, оскільки зі зростанням температури опір плазми й виділення тепла зменшуються. Струм, що тече по плазмі, створює своє магнітне поле, яке стискає плазму, збільшуючи її температуру й концентрацію, але цього ще недостатньо для досягнення критерію Лоусона, тому плазму треба нагрівати додатково. Цей додатковий нагрів може досягатися електромагнітним випромінюванням частотою від 10 МГц до 10 ГГц, потоком нейтральних атомів з високою енергією – близько 0,1 MeV – або стисненням зовнішнім змінним магнітним полем.

Плазма «живе» в магнітному полі. Постійне поле можна було б створити постійним магнітом, хоча в них є свої обмеження, але в цьому випадку питання про постійні магніти не виникає, так як потрібні змінні поля, тому використовується електромагніт, але під час протікання струму по його обмотці виділяється тепло. Коли це відбувається в плазмі, тепло використовується, а в обмотці – витрачається даремно, його треба відводити й витрачати енергію, призначену для забезпечення протікання струму по обмотках, при цьому на роботу електромагнітів витрачалася б помітна

частка отриманої енергії, а обмотки будуть робити з надпровідних матеріалів.

Однією з важливих проблем ТОКАМАК є забезпечення чистоти плазми, так як домішки, що потрапляють у плазму, припиняють реакцію. Потрапляють вони в плазму зі стінок камери, так як робочі речовини, що запускають в обсяг, можна очистити, а стінка камери працює в таких умовах, що проблема – з чого і як її зробити – отримала власну назву – «проблема першої стінки». Усе, що виходить із плазми (нейтрони, протони, іони й електромагнітне випромінювання в діапазоні від інфрачервоного до гамма-променів), руйнує стінку, продукти руйнування потрапляють у плазму. Проблема стійкості та проблема «нешкідливості» вирішуються в протилежних напрямках, тому що, чим важчий іон, тим він шкідливіший (допустима концентрація танталу й вольфраму в сто разів менша, ніж вуглецю), а більшість стійких матеріалів створено на основі саме важких металів. Свого часу великі надії покладалися на вуглецеві матеріали та композити на основі карбідів, боридів і нітридів. Розглядалися пористі й профільовані (з ребрами або голками) стінки. І взагалі важко сказати, що не

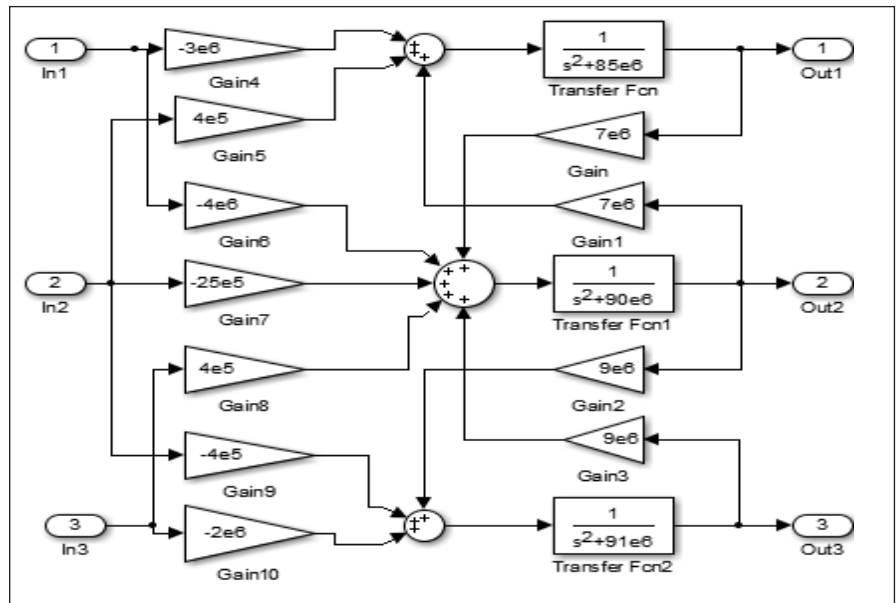


Рис. 2. Структурна схема моделі динаміки плазмового шнура в установці ТОКАМАК

розглядалося, але в підсумку як матеріал стінок зараз обраний берилій.

Є три можливості.

Перша можливість – розігнати в прискорювачі пучок іонів і бомбардувати ними тверду мішень. Цей шлях неефективний: енергія витрачається на іонізацію атомів мішені, а не на зближення ядер.

Другий шлях – направити назустріч один одному два прискорених пучки іонів, але й цей шлях неефективний через низьку концентрацію ядер у пучках і малий час їх взаємодії.

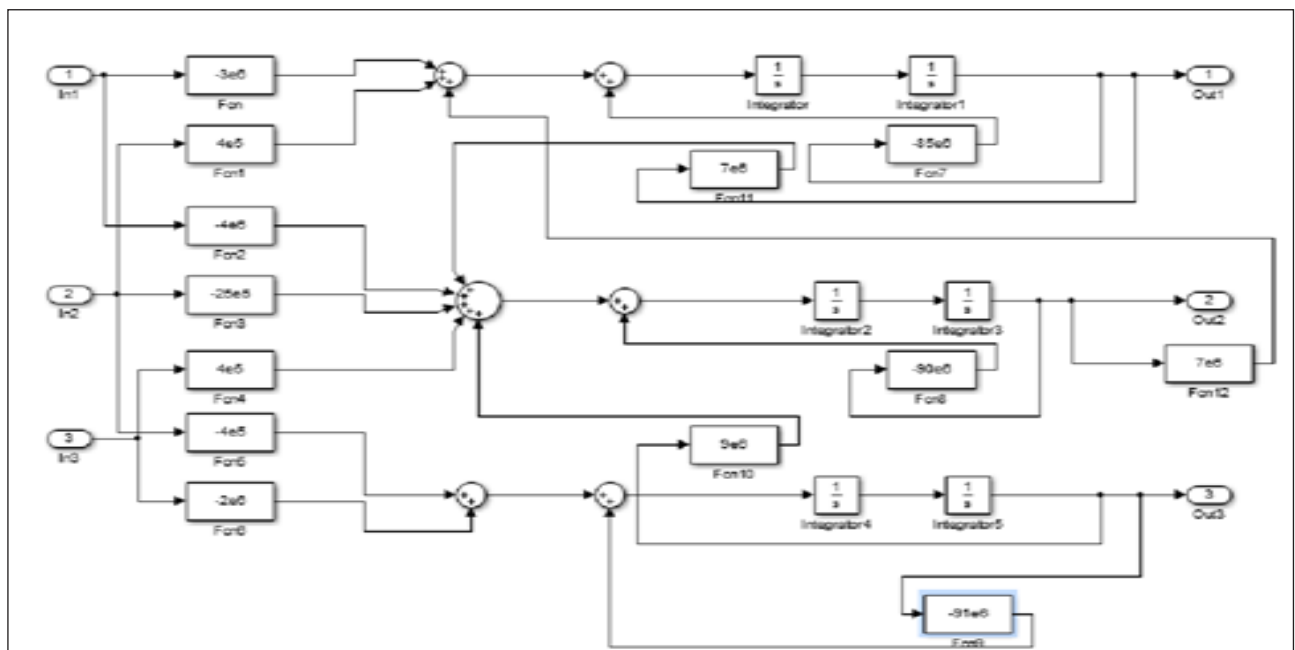


Рис. 3. Структурна схема моделі динаміки в просторі станів

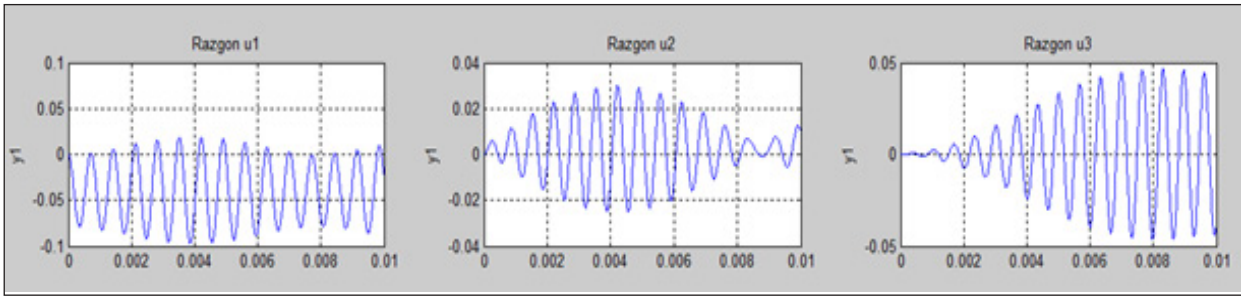


Рис. 4. Розгінні характеристики по першому виходу й подачі сигналів по всіх трьох входах

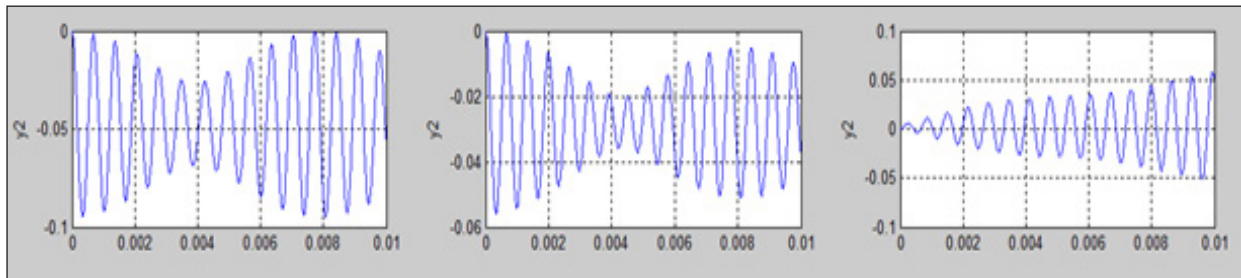


Рис. 5. Розгінні характеристики по другому виходу й подачі сигналів по всіх трьох входах

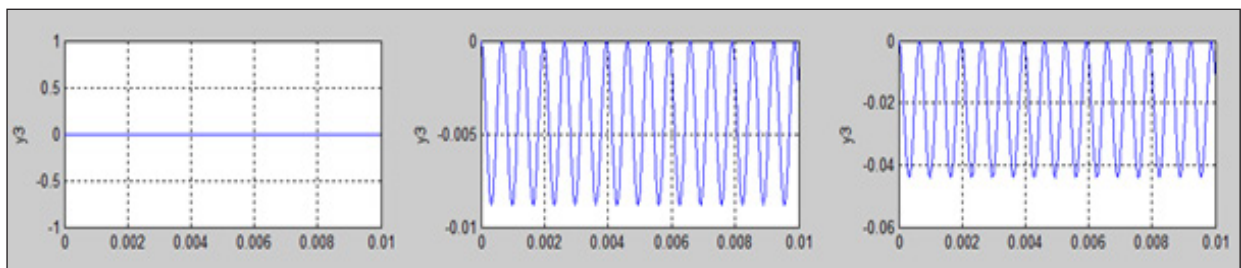


Рис. 6. Розгінні характеристики по третьому виходу й подачі сигналів по всіх трьох входах

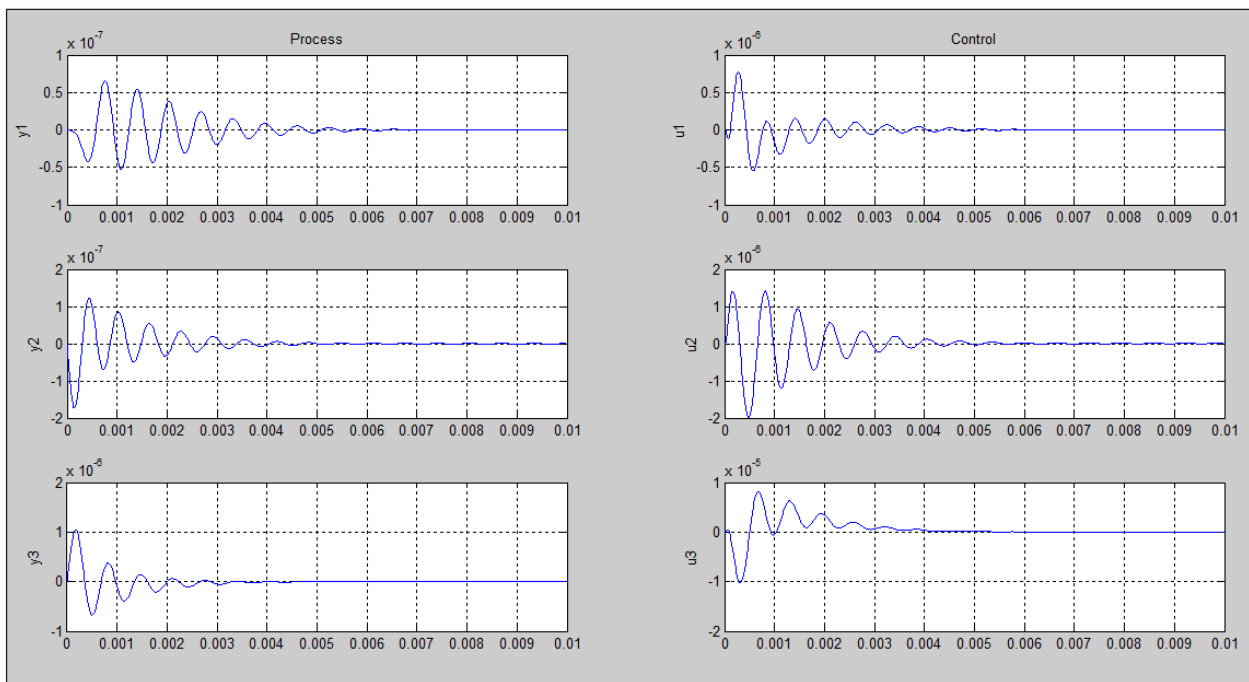


Рис. 7. Перехідні процеси

Третій шлях – нагрівання речовини до температур порядку 100 млн. градусів. Чим вища температура, тим вища середня кінетична енергія частинок і тим більша їх кількість може подолати кулонівський бар'єр. Цей метод і реалізований у ТОКАМАК.

Керування ведеться за допомогою керуючих обмоток, що генерують тороїдальне магнітне поле вздовж орт. Збурення мають імпульсну природу і типово мають значення  $[0; -10^{-7}; -0,5 \cdot 10^{-3}]$ .

Математична модель подана розробниками у вигляді структурної схеми, що представлена на рис. 2. Керуючими входами моделі є складники магнітного потоку за осями координат, визначаються у веберах [Вб]. Виходами моделі є відхилення положення плазмового шнура за осями координат, визначаються у  $[м \cdot 10^{-6}]$ .

Беручи до уваги структурну схему, зображену на рис. 2, дійдемо такої моделі шляхом заміни кожної передаточної функції вигляду  $\frac{1}{s^2+k}$

Будемо показувати у вигляді системи  $x_2' = -k \cdot x_1 + u, x_1' = x_2, y = x_1$ , отримаємо структурну схему, зображену на рис. 3.

Із цієї схеми отримано розгінні характеристики по першому, другому і третьому виходах і подачі сигналів по всіх трьох входах, які показані на рис. 4, 5, 6.

Із цих графіків ми бачимо, що процеси коливальні, стоять на межі стійкості, це зумовлює такі обставини:

1. Апарат без регулювання функціонувати не може.

2. Обладнання має бути найбільш надійне.

Перехідні процеси можна побачити на рис. 7.

На графіках перехідних процесів можна побачити, що відбуваються відносно невеликі відхилення в коливаннях, а для цього процесу це добре. Затухання коливань після системи відбувається швидше, ніж на вході, що теж досить добре характеризує систему.

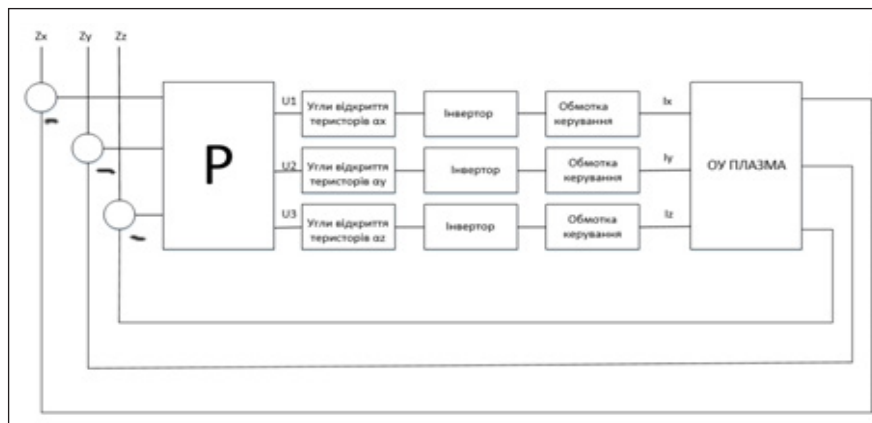


Рис. 8. Структурна схема системи керування

Структурна схема системи керування, що розробляється, має вигляд, поданий на рис. 8. На цій схемі бачимо, що сигнал подається на кутки відкриття тиристорів, після чого йде на інвертор, у якому напруга перетворюється в змінний багатозфазний струм. Після інвертора йдуть обмотки керування, по цих обмотках іде регульований струм, який використовується в процесі керування плазмою.

**Висновки.** Система ТОКАМАК призначена для видобутку електроенергії з термоядерного синтезу. Якщо добитися результату утримання плазми на стабільному рівні, то ТОКАМАК може замінити АЕС, адже він економічніший у плані пального, для його роботи потрібно всього пару грамів пального, і воно не складується як на АЕС, а відразу використовується. Відходи також безпечні для навколишнього середовища.

Якщо можна буде добитися повної автоматизації під час збільшення робочих годин установки та простежити, скільки енергії до аварійного стану буде вироблено, тоді можна вирахувати, чи за цей період станція себе окупить. Якщо станція окупить себе, то можна буде будувати такі станції на безлюдних місцях, оскільки загроза від аварії у вигляді плазми все ж є, одразу ж після аварії однієї будувати іншу. У разі автоматизації процесу для роботи станції потрібно буде лише декілька операторів, щоб наглядали за показниками на відстані.

#### Список літератури:

1. Стопакевич А.А. Системный анализ и теория сложных систем управления. Одесса, 2013. С. 62–65.
2. Орлинский Д.В. Общая характеристика комплекса диагностики плазмы на установке Т15. Электромагнитные измерения, измерения плотности. Москва, 1985. С. 32–36.
3. Захаров Л.Е., Шафранов В.Д. Интегральные соотношения для равновесного тороидального плазменного шнура с некруглым сечением. Журнал технической физики. 1986. Вып. 2. С. 79–84.
4. Самойленко Ю.И. Управление быстропротекающими процессами в термоядерных установках. Киев. 1988. С. 379.



**СОВРЕМЕННАЯ ЦИФРОВАЯ МНОГОСВЯЗНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ  
ОСНОВНЫМИ КОНТУРАМИ – ПОЛОЖЕНИЯ ПЛАЗМЕННОГО ШНУРА –  
УСТАНОВКИ ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА ТОКАМАК**

*ТОКАМАК – устройство для осуществления реакции термоядерного синтеза в горячей плазме в квазистационарном режиме, причем плазма создается в тороидальной камере и ее стабилизирует магнитное поле. Назначение установки – преобразование внутриядерной энергии в тепловую и далее в электрическую. Слово «ТОКАМАК» является аббревиатурой от названия «тороидальная камера магнитная», однако создатели установки заменили в конце «г» на «к», чтобы не вызвать ассоциаций с чем-то магическим.*

*Атомную энергию (и в реакторе, и в бомбе) человек получает, разделяя ядра тяжелых элементов на более легкие. Энергия, приходящаяся на нуклон, максимальная для железа (так называемый «железный максимум»), а так как максимум посередине, то энергия будет выделяться не только при распаде тяжелых, но и при соединении легких элементов. Этот процесс называется термоядерным синтезом, он происходит в водородной бомбе и термоядерном реакторе. Термоядерных реакций, реакций синтеза, известно много. Источником энергии могут быть те, для которых недорогое топливо, причем возможны два принципиально разных пути запуска реакции синтеза.*

**Ключевые слова:** ТОКАМАК, атомная энергия, математическая модель, переходный процесс, плазменный шнур.

**MODERN DIGITAL MULTIPLAYER CONTROL SYSTEM BY MAIN CONTROL –  
POSITION OF PLASMA SHEET – INSTALLATION OF THERMOBILE SYNTHESIS TOKAMAK**

*TOKAMAK – device for carrying out the reaction of thermonuclear fusion in a hot plasma in quasi-stationary mode, and the plasma is created in the toroidal chamber and stabilizes the magnetic field. The purpose of the installation – the transformation of the internal nuclear energy into the heat and further – into the electric. The word tokamaks is an abbreviation of the name “toroidal camera magnetic”, but the creators of the installation replaced at the end of the “g” on “k”, so as not to cause associations with something magical.*

*The atomic energy (both in the reactor and in the bomb) is obtained by separating the nuclei of the heavy elements into lighter ones. The energy that falls on the nucleon is maximum for iron (the so-called “iron maximum”), but as the maximum in the middle, then the energy will be allocated not only when the heavy disintegration, but also when the light elements are connected. This process is called fusion, it occurs in a hydrogen bomb and a thermonuclear reactor. Thermonuclear reactions, synthesis reactions are known. The source of energy may be those for which there is inexpensive fuel, and there are two fundamentally different ways to start the synthesis reaction.*

**Key words:** TOKAMAK, atomic energy, mathematical model, transient process, plasma cord.

**Жученко О.А.**

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

**Коротинський А.П.**

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

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ОХОЛОДЖЕННЯ У БАГАТОКАМЕРНИХ ПЕЧАХ ВИПАЛЮВАННЯ ВУГЛЕЦЕВИХ ВИРОБІВ

*Якісне управління процесом випалювання вуглецевих виробів шляхом зміни параметрів технологічного режиму дозволяє досягнути меншого виходу бракованої продукції. З використанням чисельного моделювання проведено дослідження особливостей процесу охолодження камери печі випалювання вуглецевих виробів. Досліджено залежність температурних полів камери печі та температури повітря на виході з камери від надлишку повітря, що подається на горіння палива. Досліджувались температури вуглецевих заготовок, пересипки та газового середовища у двох режимах роботи: при надлишку повітря  $a=1,1$  та  $a=1,2$ . Результати дослідження спрямовані на підвищення ефективності проведення кампанії випалювання в цілому.*

**Ключові слова:** випалювання, чисельне моделювання, надлишок повітря, температурні поля, процес охолодження.

**Вступ.** Вуглецеві вироби у вигляді графітованих електродів, ніпелів, вуглецевих блоків, анодів знайшли широке розповсюдження у різних галузях промисловості, зокрема металургійній, хімічній, металообробній, машинобудівній, нафтохімічній та інших.

Одним із основних технологічних процесів виробництва вуглецевих виробів є випалювання заготовок, тобто їх термічна обробка за температур 900–1300 °С з метою підвищення механічної міцності, термостійкості, електро- та теплопровідності тощо.

У зв'язку з цим підвищення ефективності процесу випалювання вуглецевих виробів є актуальною науково-технічною задачею.

**Постановка проблеми.** Якість вуглецевих виробів визначається державним стандартом ДСТУ 4494:2005, технічними умовами ТУ У 27.9-00196204-005:2013, в яких висуваються вимоги до механічної міцності, термостійкості, електро- та теплопровідності, густини, пористості, модуля пружності, вмісту золи тощо. Всі ці показники у процесі випалювання заготовок повністю визначаються температурним режимом процесу [1, с. 1; 2, с. 2]. Тому дослідження температурних полів, що формуються у процесі випалювання за різних режимів його ведення, є важливим етапом, котрий передувє синтезу системи керування даним процесом, яка повинна забезпечити оптимальні експлуатаційні умови роботи.

На процес випалювання впливають декілька факторів: витрата палива, надлишок витрати повітря, рівень розрідження, яке створюється у камерах печі випалювання.

Як відомо, процес випалювання вуглецевих виробів проходить три стадії: нагрівання, «під вогнем» та охолодження. Метою цієї статті є дослідження температурних полів у процесі охолодження вуглецевих виробів під час їх випалювання [3, с. 2].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Багатокамерні печі є досить складним об'єктом, що і обумовлює велику кількість досліджень особливостей процесів, що протікають в них.

У роботах [2, с. 4; 3, с. 5; 4, с. 2] наведено дослідження впливу коефіцієнта поглинання димових газів, ступеня чорноти газових каналів, співвідношення між радіаційним і конвективним теплообміном, комбінованої пересипки, схеми завантаження камери печі, геометрії внутрішньої поверхні склепіння. Також представлені результати експериментальних досліджень трьох кампаній випалювання вуглеграфітової продукції у печах типу Рідгаммера з різними конструкціями і технологічними регламентами.

У праці [5, с. 2] наведено результати дослідження впливу швидкості підводу теплоти на якість кінцевої продукції та проведено співставлення температурних графіків печей відкритого

та закритого типу. Розглянуті такі фактори, як тривалість нагрівання та розмір заготовок на ступінь випалювання.

У монографії [6, с. 61] отримані результати експериментальних та теоретичних досліджень, що дозволяють визначити найбільш раціональні діапазони температур процесу випалювання. Наводяться результати промислового експерименту і математичного моделювання температурних режимів випалювання. Експериментально визначено залежність температури у тілі електрода від температури газової фази і режимних параметрів процесу випалювання.

У наведених вище роботах не розглядається процес охолодження камери печі як окремих складників кампанії випалювання та, відповідно, не розглядаються впливи керувальних технологічних параметрів на цей процес.

**Формулювання цілей статті.** Метою даної статті є дослідження температурних режимів процесу охолодження у багатокамерних печах випалювання вуглецевих виробів.

Дослідження полягають у визначенні:

- рівня температур заготовок за охолодження повітрям, що йде на спалювання;
- швидкості зміни мінімальної та максимальної температур в заготовках;
- перепаду температур в заготовках і по камері печі в цілому;
- дослідження впливу коефіцієнта надлишку повітря на процес охолодження заготовок і впливу на температурні поля камери.

**Виклад основного матеріалу.**

**Умови проведення дослідження.** Проводиться дослідження камери, в яку завантажено 5 заготовок діаметрами 700 мм та висотою 2100 мм. Прийнято, що початкова температура всіх складових частин касети печі складає 1273 К. Температура повітря 300 К. Відповідно до витрати палива 30 м<sup>3</sup>/год та складу природного газу, наведеного у таблиці 1, витрата повітря за надлишку  $\alpha = 1,2$  складає 339 м<sup>3</sup>/год, за надлишку  $\alpha = 1,1$  – 310,8 м<sup>3</sup>/год.

Таблиця 1

## Склад природного газу

CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	Сума
93,0	1,2	0,7	0,4	0,2	0,2	3	1	100

Для подальшого числового моделювання прийнято наведені в таблицях 2–5 фізичні властивості матеріалів печі випалювання та її завантаження відповідно до [7–9].

Таблиця 2

## Теплофізичні властивості вогнетривкого шамоту

T, K	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Ср, Дж/(кг•К)	$\lambda$ , Вт/(м•К)
273	1900	675	0,84
323	1900	797	-
373	1900	877	-
423	1900	933	-
473	1900	975	-
523	1900	1008	0,99
773	1900	1111	1,14
1023	1900	1176	1,29
1273	1900	1230	1,44
1523	1900	1279	1,59

Таблиця 3

## Теплофізичні властивості матеріалу заготовок

T, K	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Ср, Дж/(кг•К)	$\lambda$ , Вт/(м•К)
273	1635	690	8
400	1635	893	-
500	1635	1160	8,3
600	1635	1315	-
700	1635	1423	-
800	1635	1501	8,5
900	1635	1566	-
1000	1635	1620	8,8
1100	1635	1669	-
1200	1635	1710	9,3
1400	1635	1790	-

Таблиця 4

## Теплофізичні властивості теплоізоляційної шихти

T, K	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Ср, Дж/(кг•К)	$\lambda$ , Вт/(м•К)
273	800	690	0,35
400	800	893	-
500	800	1160	-
600	800	1315	-
700	800	1423	-
800	800	1501	0,73
900	800	1566	-
1000	800	1620	-
1100	800	1669	-
1200	800	1710	1,25
1400	800	1790	-

Для проведення досліджень було реалізовано геометрію касети печі випалювання розміром 3,8×0,76×4,05 м. Прийнято, що тривалість процесу випалювання 480 год., число камер на охолодженні – 1, число камер під вогнем – 1, число камер на підігріві димовими газами – 4, відповідно – темп випалювання складає 96 год.

Таблиця 5

Теплофізичні властивості повітря

T, K	Ср, Дж/(кг•K)	λ, Вт/(м•K)
273	1005	0,0244
373	1009	0,0321
473	1026	0,0393
573	1047	0,046
673	1068	0,0521
773	1093	0,0574
873	1114	0,0622
973	1135	0,0671
1073	1156	0,0718
1173	1172	0,0763
1273	1185	0,0807
1373	1197	0,085
1473	1210	0,0915

З технології процесу випалювання вуглецевих матеріалів відомо, що необхідне для спалювання газу повітря проходить попередньо через камеру, в якій знаходяться вже обпалені заготовки з досить високою температурою (до 1000°C). Таким чином, повітря для спалювання природного газу нагрівається і подається до камери «під вогнем» з температурою 250–350°C. За умови збільшення кількості охолоджувальних камер температура повітря, що підігрівається, також підвищується і може досягати 600–800°C [6 с. 16].

Враховуючи те, що охолодження камери печі відбувається повітрям, яке у подальшому йде на горіння палива, для проведення чисельного моделювання процесу охолодження необхідно знати витрати повітря, потрібного для горіння палива, для чого треба провести відповідний розрахунок.

**Розрахунок витрати повітря.** Потрібна витрата повітря для горіння визначається з теоретичної витрати кисню, який входить у реакції окислення з урахуванням деякого надлишку, що забезпечує повне згоряння палива.

У розрахунках приймають такий склад повітря: азот – 79,0% і кисень – 21,0% за обсягом. Кількість вологи, що вноситься атмосферним повітрям, незначно збільшує витрату повітря і враховується (в основному під час розрахунку сушил) його вологовміст, виражений у вагових одиницях. Під час розрахунку печей вологість атмосферного повітря зазвичай не враховується.

Теоретично потрібна для горіння витрата повітря визначається таким чином [10, с. 24]:

$$L_0 = 4.76V_{O_2}, \quad (1)$$

де  $V_{O_2}$  – теоретично потрібна витрата кисню.

Теоретично потрібна витрата повітря для горіння природного газу розраховується за формулою [10, с. 24]:

$$L_0 = 0.0476(2CH_4 + 3.5C_2H_6 + 5C_3H_8 + 6.5C_4H_{10} + 8C_5H_{12}) \quad (2)$$

де  $CH_4, C_2H_6 \dots$  – відсоткові відношення.

Дійсна витрата повітря з урахуванням коефіцієнта витрати повітря дорівнює [10, с. 25]:

$$L_a = aL_0, \quad (3)$$

де  $a$  – коефіцієнт витрати повітря, що показує відношення дійсної кількості повітря, введеного для горіння, до теоретично потрібного. Для газу та мазуту коефіцієнт витрати повітря  $a=1,05-1,20$  [8].

Якщо відома витрата палива  $V$ , то загальна витрата повітря, необхідного для спалювання палива, складе [10 с. 26]:

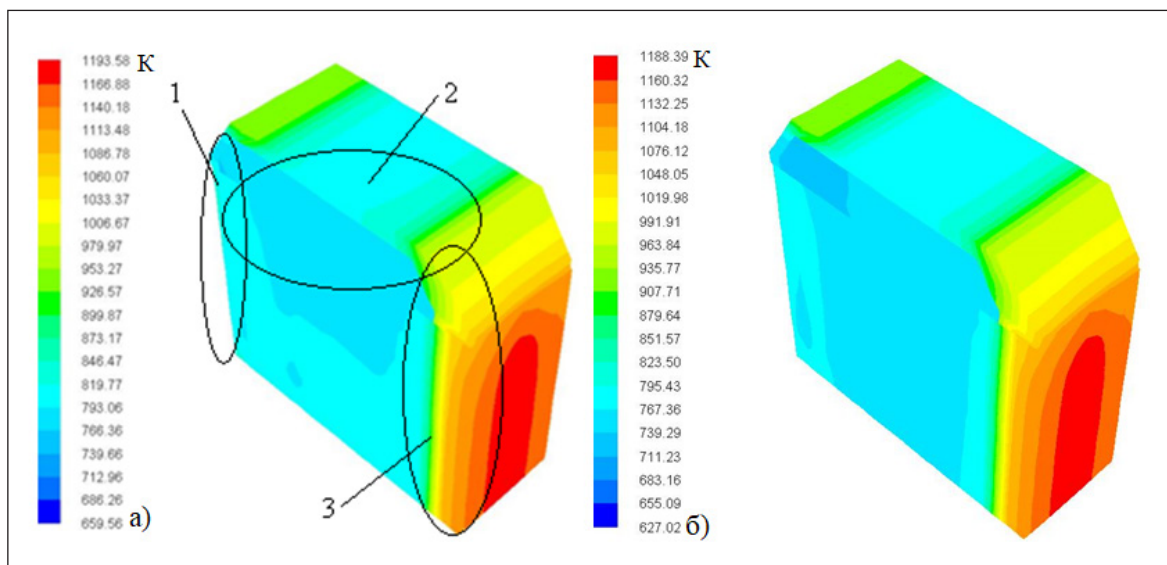


Рис. 1. Температурне поле касети наприкінці охолодження за надлишком повітря ((а) –  $a=1,1$ , (б) –  $a=1,2$ )

$$V_{\text{пог}} = BL_a \quad (4)$$

**Результати дослідження.** Максимальна температура по всьому об'ємові камери печі за  $a=1,1$  складає 1193 К, за  $a=1,2$  досягає 1188 К. Мінімальна температура за  $a=1,1$  – 739 К, за  $a=1,2$  – 683 К, що наведено на рис. 1. Відповідно, перепад температур по всьому об'ємові касети сягає 454 К та 505 К. Очевидним є той факт, що за умови збільшення витрати повітря температури по всьому об'ємові касети зменшуються, проте перепад температур збільшується.

Результати дослідження свідчать про наявність трьох особливих зон печі. Зона 1 – «холодна зона» печі – зона печі, де температура мінімальна. Наявність цієї зони обумовлена розташуванням газового каналу,

через який подається повітря. Саме тут «починається» охолодження касети, а тому і значення температур тут найменше. Зона 2 – «підсклепінчата зона» печі. Особливість цієї зони полягає у її розташуванні. У зв'язку з тим, що під склепінням печі завжди знаходиться велика кількість повітря, то і охолодження зони 2 відбувається досить інтенсивно порівняно з іншими частинами касети. Зона 3 – «гаряча зона» печі, наявність цієї зони обумовлена значною акумуляцією теплоти стінкою печі та її повільним охолодженням повітрям, температура якого значно вище у зв'язку з його нагріванням через проходження газового тракту печі. Тому і охолодження у цій зоні відбувається найдовше.

На рис. 2 представлені температурне поле пересипки наприкінці процесу охолодження при різних надлишках повітря. Як і у попередньому

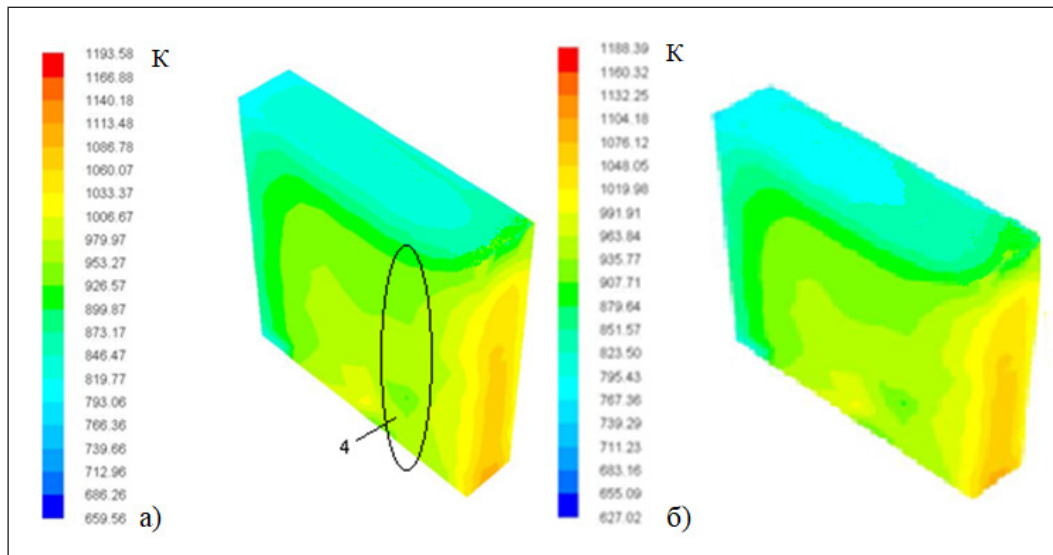


Рис. 2. Температурне поле касети наприкінці охолодження за надлишку повітря ((а)–  $a = 1,1$ , (б) –  $a = 1,2$ )

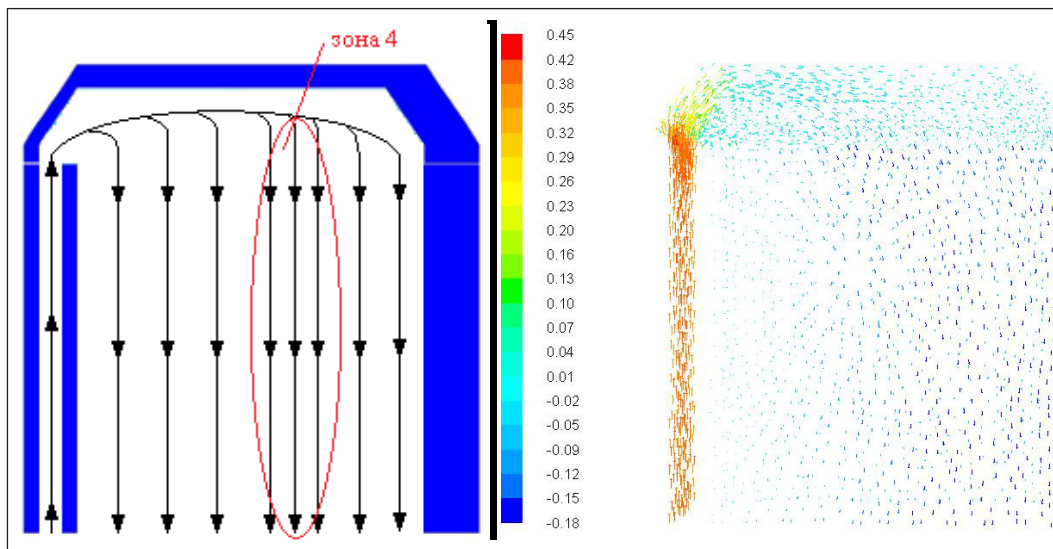


Рис. 3. Схематичне зображення руху повітря у газовому тракті печі випалювання

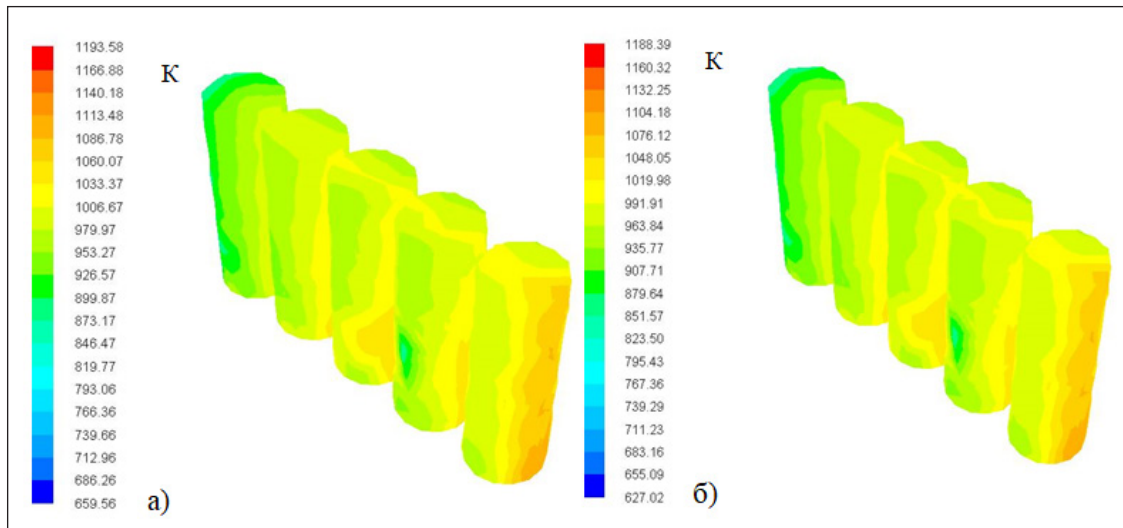


Рис. 4. Температурне поле касети наприкінці охолодження за надлишку повітря ((а)–  $a = 1,1$ , (б) –  $a = 1,2$ )

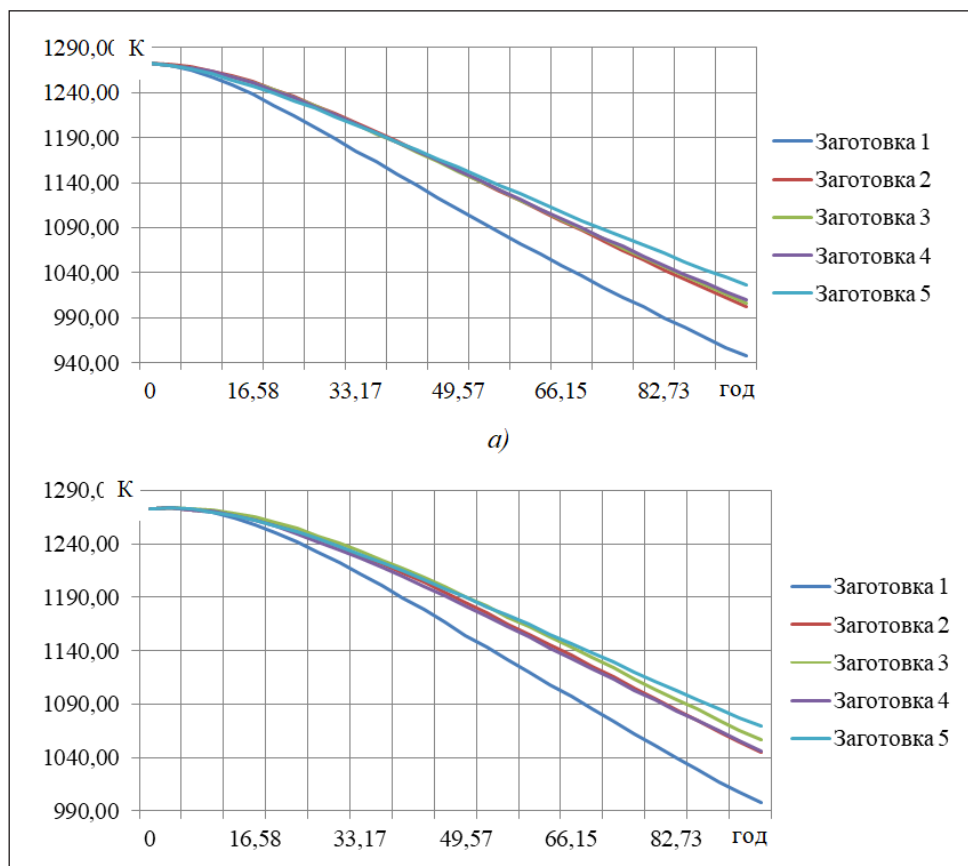


Рис. 5 Графік зміни мінімальної (а) та максимальної (б) температур по заготовкам при надлишку повітря  $a = 1,1$

випадку, прослідковується наявність характерних зон печі, що описані вище. Додатково можна виділити четверту зону, що знаходиться ближче до гарячого краю печі, проте температури у цій зоні значно нижче. Це пояснюється особливістю руху повітря у газовому тракті (рис. 3).

Характер температурних полів в обох випадках майже однаковий та відрізняються лише значення температур. Значення перепаду температур по всьому об'єму пересипки складає близько 300 К.

Дослідження показали, що охолодження проходить інтенсивніше ближче до «холодної

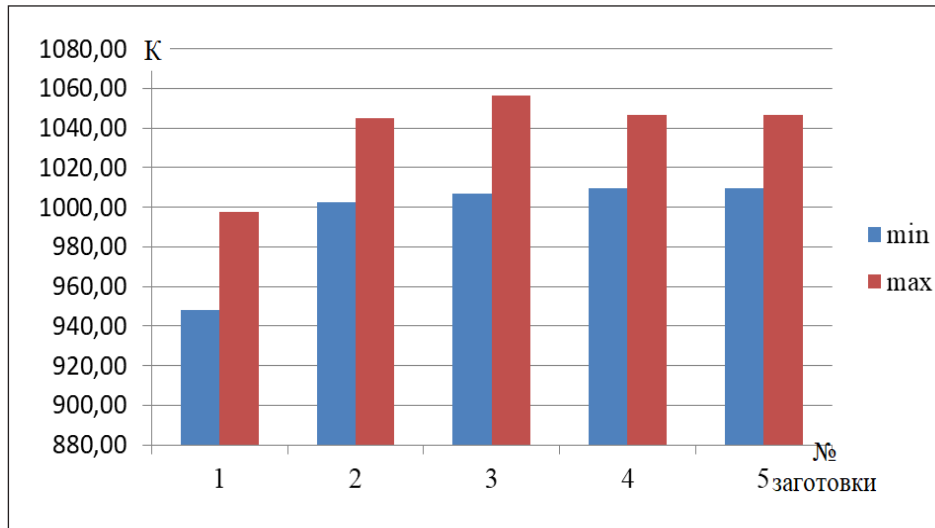


Рис. 6. Гістограма мінімальних та максимальних значень температури по заготовкам при надлишку повітря  $a = 1,1$

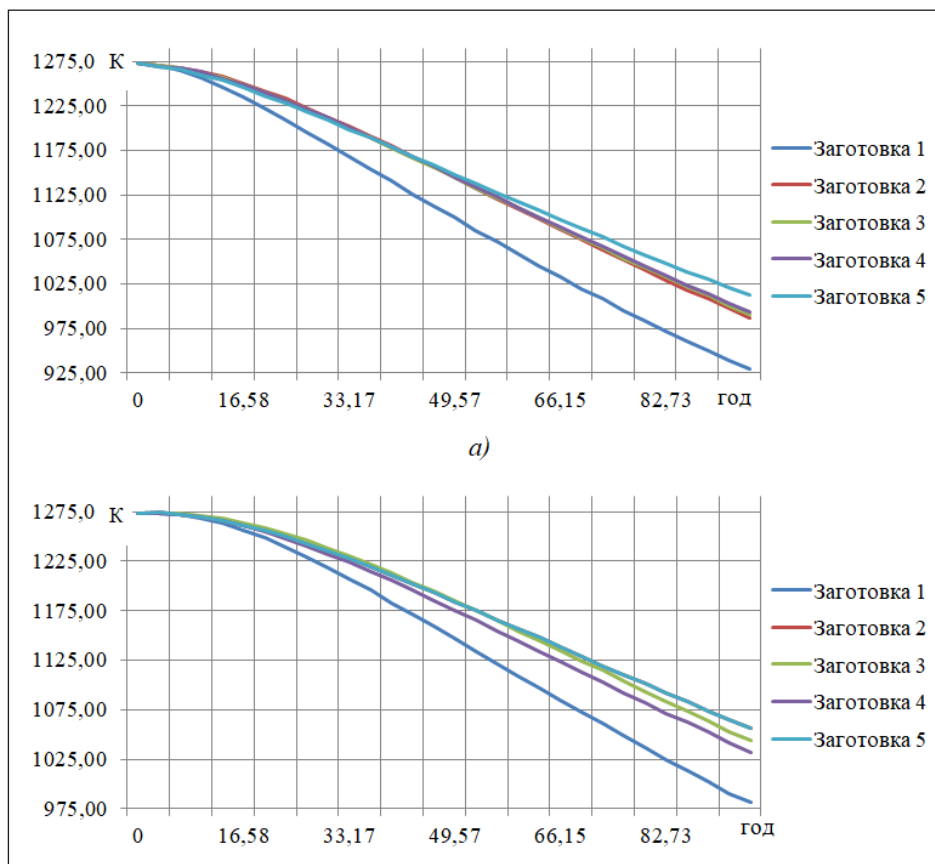


Рис. 7. Графік зміни мінімальної (а) та максимальної (б) температури за заготовками за надлишку повітря  $a = 1,2$

зони» та повільніше біля «гарячої зони» печі, що насамперед і обумовлює перепад температур по горизонталі. Наявність «підсклепінчатої зони» печі та нагрів повітря під час проходження газових трактів обумовлює перепад температур по вертикалі. Очевидний значний

вплив четвертої зони на температуру заготовки № 4 (рис. 4).

На рис. 5 показана динаміка температур за заготовками у процесі охолодження за надлишку витрати повітря  $a = 1,1$ . На рис. 6 – гістограми мінімальних та максимальних температур наприкінці

оохолодження за тих самих умов. На рис. 7 та рис. 8 відповідні результати за надлишку витрати повітря  $a = 1,2$ .

З отриманих результатів дослідження видно, що оохолодження заготовки № 4 відбувається інтенсивніше, ніж заготовки № 3, хоча вона розташована ближче до гарячої зони печі. Це підтверджує наявність четвертої зони печі та демонструє збільшення її впливу за збільшення надлишку витрати повітря.

Найбільш інтенсивне оохолодження заготовок відбувається в інтервалі 10–13 годин. Вочевидь, саме стільки часу потрібно, щоб оохолодити пересипку та стінки газового тракту.

Отримані результати числового моделювання показують, що протягом перших 3–4 годин відбувається нагрів заготовок оорієнтовно на 1–4 К. Це своєю чергою дозволяє говорити про існування ефекту «довипалювання» після етапу камери «під вогнем».

За збільшення витрати повітря збільшується перепад температур за заготовками, що ілюструється гістограмою 9. Середнє значення перепаду температур за  $a = 1,1$  складає 42,97 К, а за  $a = 1,2$  – 51,23 К

Важливим показником процесу оохолодження є температура повітря на виході з камери. Зміну температури повітря на виході з касети впродовж всього етапу оохолодження ілюструє рис. 10. З цього рисунку видно, що за меншої витрати повітря його температура на виході більша, що не протирічить фізиці процесів, які відбуваються.

Наведені вище результати не повністю характеризують ефективність процесу оохолодження. Саме тому доцільно розглянути витрати теплоти, що виходить з повітрям після оохолодження:

$$Q_{нов} = L_a \cdot i_{нов}$$

де  $L_a$  – витрата повітря, що подається для горіння палива,  $i_{нов}$  – ентальпія повітря (залежить від температури). Результати представлені на рис. 11.

Очевидно, що при надлишку повітря  $a = 1,2$  витрата теплоти, що виходить з камери печі, зна-

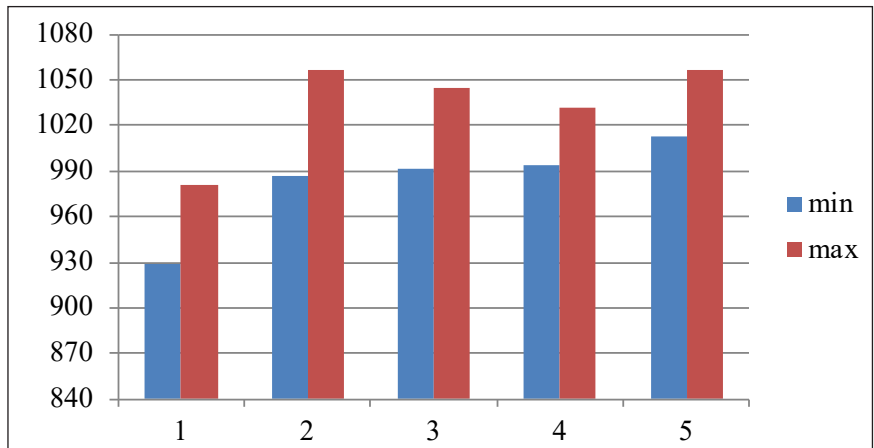


Рис. 8. Гістограма мінімальних та максимальних значень температури за заготовками за надлишку повітря  $a = 1,2$

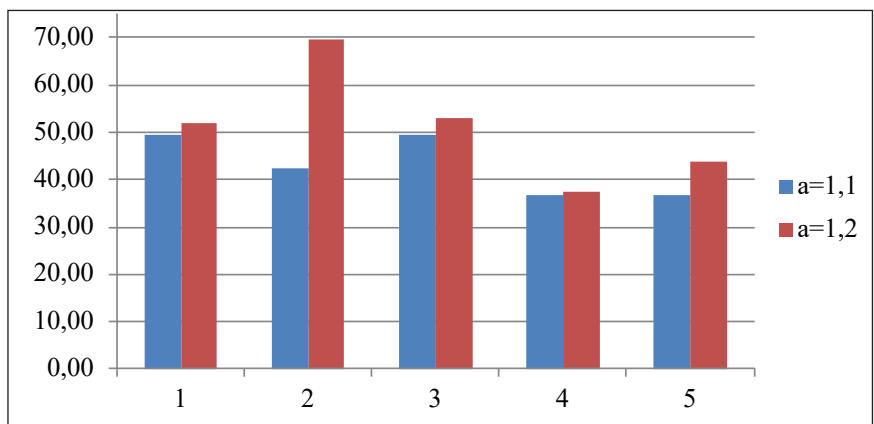


Рис. 9. Гістограма перепаду температур за заготовками за надлишку повітря  $a = 1,1$  та  $a = 1,2$

чно вище, що позитивно впливає на інтенсивність оохолодження. Крім того, при цьому більше теплоти буде внесено у камеру, яка знаходиться «під вогнем». Проте одночасно на спалювання подається повітря з меншою температурою, що призведе, своєю чергою, до зниження температури факелу. Як змінюється температура повітря після оохолодження заготовок у цьому діапазоні зміни коефіцієнта за витрати повітря  $a = 1,05 \dots 1,2$ , показано на рис. 12.

**Висновки.** Проведено дослідження температурних режимів процесу оохолодження у багатокамерних печах випалювання вуглецевих виробів.

Побудовані температурні поля пересипки та касети, що досліджувалась, загалом. Особливу увагу приділено дослідженню розподілу температур у заготовках, що оохолоджуються. Проаналізована динаміка температур за заготовками на протязі всієї кампанії оохолодження.

Розраховані мінімальні та максимальні температури заготовок та побудовані відповідні діаграми.



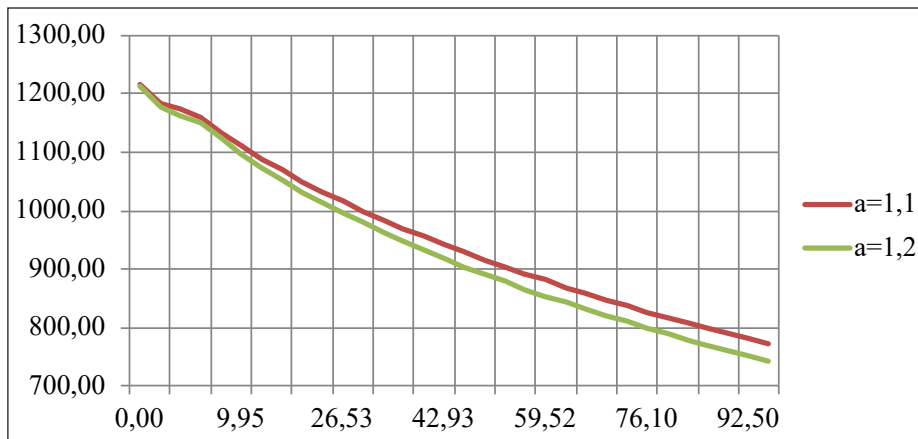


Рис. 10. Графік зміни середньої температури повітря на виході з касети за надлишку повітря  $a = 1,1$  та  $a = 1,2$

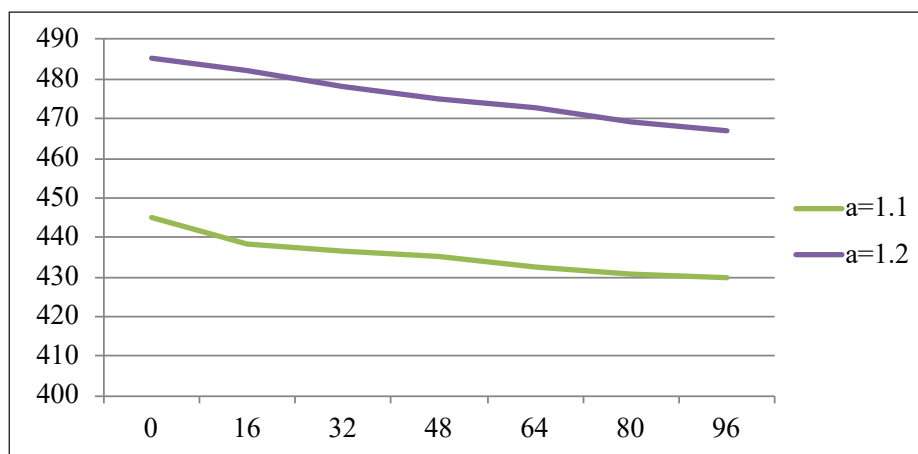


Рис. 11. Графік зміни витрати теплоти, що виходить з камери печі протягом всього процесу охолодження

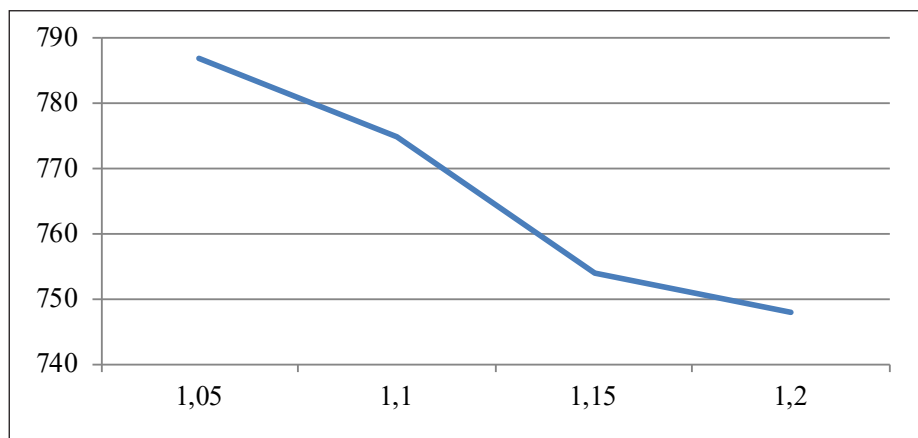


Рис. 12. Графік зміни температури підігрітого повітря від коефіцієнта надлишку повітря

Для оцінювання ефективності процесу охолодження розраховані витрати теплоти та кінцеві температури повітря, що виходить з камери охолодження за різних режимів роботи.

Отримані результати дослідження мають бути використані під час побудови системи керування процесом випалювання вуглецевих виробів, що і є предметом подальших досліджень.

**Список літератури:**

1. Панов Е. Н., Карвацкий А. Я., Шилович И. Л., Лелека С. В., Пулинец И. В., Лазарев Т. В. Повышение эффективности обжига углеграфитовых заготовок. Вісник НТУУ «КПІ». Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження: зб. наук. праць. 2011. №1 (7) С. 25—30.
2. Карвацкий А.Я., Лелека С.В., Пулинец И.В., Лазарев Т.В., Совершенствование регламентов обжига с учетом динамики газовой выделения обжигаемых заготовок. Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2011. № 6/5 (54). С. 42—45.
3. Panov Ye.N., Kutuzov S.V., Karvatsky A.Ya., Shilovich I.L., Vasilchenko G.N., Shilovich T.B., Leleka S.V., Danilenko S.V., Pulinets I.V., Chirka T.V., Lazarev T.V. Power saving at production of electrode products. XVII Intern. Conf. «Aluminium of Siberia», V Conference «Metallurgy of Non-Ferrous and Rare Metals», VII Symposium «Gold of Siberia», (Krasnoyarsk, Russia, Sept. 7–9, 2011): Proceedings of the Intern. Congress, Krasnoyarsk: «Verso», 2011. P. 412—423.
4. Шилович И.Л., Пулинец И.В. Расчетно-экспериментальное исследование процесса обжига углеграфитовых изделий в многокамерных печах. Зб. тез доп. XIII Міжн. науково-практ. конф. студ., асп. та мол. вчених “Екологія. Людина. Суспільство” НТУУ “КПІ”, 2010. С. 244—245.
5. Borzu Baharvand Mohebn Ameri Siahouei Mohammad Nabi Batoei Saeb Sadeghi Study on Anode Baking Parameters in Open-Top and Closed-Type Ring Furnaces Light Metals 2013 pp 1145-1150
6. Пулинец И.В., Панов Е.Н., Карвацкий А.Я., Лелека С.В., Лазарев Т.В., Чирка Т.В. Теплообмен в многокамерных печах обжига углеграфитовых изделий., Київ НТУУ «КПІ» 2014
7. Сошкин Г.С. Исследование процесса обжига электродной продукции в многокамерных печах и разработка системы оптимального управления Владикавказ 2012.
8. Лутков А.И. Тепловые и электрические свойства углеродных материалов М.: Metallurgy, 1990. 175 с.
9. Угольные и графитовые электроды для электропечей и электролизеров. (Систематическое собрание патентов, сост. М. Б. Шварцберг). Л.-М., 1938.
10. Левченко П.В. Расчет печей и сушил силикатной промышленности Москва, Высшая школа, 1968. 363 с.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОХЛАЖДЕНИЯ В МНОГОКАМЕРНЫХ ПЕЧАХ ОБЖИГА УГЛЕРОДНЫХ ИЗДЕЛИЙ**

*Качественное управление процессом обжига углеродных изделий путем изменения параметров технологического режима позволяет достичь меньшего выхода бракованной продукции. С использованием численного моделирования проведено исследование особенностей процесса охлаждения камеры печи обжига углеродных изделий. Исследована зависимость температурных полей камеры печи и температуры воздуха на выходе из камеры от избытка воздуха, подаваемого на горение топлива. Исследовались температуры углеродных заготовок, пересыпки и газовой среды в двух режимах работы: при избытке воздуха  $a=1,1$  и  $a=1,2$ . Результаты исследования направлены на повышение эффективности проведения кампании обжига в целом.*

**Ключевые слова:** обжиг, численное моделирование, избыток воздуха, температурные поля, процесс охлаждения.

**INVESTIGATION OF THE COOLING PROCESS IN MULTI CHAMBER FURNACE OF CARBON PRODUCTS BAKING**

*Qualitative management of the process of baking carbon products by changing the parameters of the technological routine allows to achieve a lower output of defective products. With the use of numerical modeling, the study of the features of the cooling process of the chamber of the baking furnace of carbon products has been carried out. The dependence of the temperature fields of the furnace chamber and the air temperature at the exit from the chamber from the excess air supplied to the combustion of fuel is studied. The temperature of carbon blanks and gas medium was investigated in two operating modes: with excess air  $a=1.1$  and  $a=1.2$ . The results of the study are aimed at increasing the effectiveness of the campaign of burning in general.*

**Key words:** baking, numerical modeling, excess air, temperature fields, cooling process.

УДК 621.311.25:621.039:661.654

**Киселёва Н.И.**

Одесский национальный политехнический университет

**Погребной Я.С.**

Одесский национальный политехнический университет

**Беглов К.В.**

Одесский национальный политехнический университет

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРОГРАММ РЕГУЛИРОВАНИЯ МОЩНОСТИ ДЛЯ СУТОЧНОГО МАНЕВРИРОВАНИЯ ЭНЕРГОБЛОКОМ АЭС С РЕАКТОРОМ ВВЭР-1000

*В энергосистеме Украины существует несоответствие между выработкой и потреблением электрической энергии в течение суточного цикла. Суммарная доля установок, предназначенных для регулирования нагрузки энергосистемы, очень мала, поэтому актуальной является адаптация действующих энергоблоков АЭС к новым специфическим условиям путем создания автоматизированной системы управления мощностью энергоблока в маневренных режимах. В работе рассмотрен сравнительный анализ традиционных программ регулирования мощности энергоблока (программы с постоянным давлением пара во втором контуре ( $P_s = \text{const}$ ) и с постоянной средней температурой теплоносителя в первом контуре ( $t_{cp} = \text{const}$ )) в маневренном режиме, с точки зрения устойчивости реактора. Аксиальный офсет характеризует равномерность энерговыделения по высоте активной зоны реактора, следовательно, и его устойчивость. Неравномерность нейтронного поля реактора снижает экономические показатели работы реакторной установки и в некоторых случаях может привести к возникновению предаварийных и аварийных ситуаций.*

**Ключевые слова:** регулятор, программа регулирования, мощность, Энергоблок, аксиальный офсет.

**Постановка проблемы.** В многочисленных работах, посвященных проблеме покрытия переменной части графиков нагрузок [1, с. 16–19; 2, с. 128–139], указывается, что повышение доли АЭС в общей установленной мощности требует повышенной маневренности энергооборудования АЭС, то есть работы энергоблоков АЭС в переменном режиме. Периодическое перераспределение энерговыделения по высоте АКЗ реактора под действием ксеноновых колебаний является одной из основных проблем обеспечения безопасной эксплуатации и устойчивости АКЗ реактора энергоблока в существующих стационарных АСР. Для решения этой проблемы разработана математическая модель [4, с. 108–122], с помощью которой исследовалась устойчивость реактора при различных программах регулирования, в маневренном режиме, опираясь на значения аксиального офсета.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Авторы Т.В. Фощ, М.В. Максимов, М.В. Никольский написали статью на тему «Анализ влияния методов управления мощностью энергоблока с водо-водяным реактором на аксиальный офсет». Статья посвящена анализу влия-

ния методов управления мощностью энергоблока с ВВЭР-1000 в маневренном режиме на количественную меру устойчивости, а именно на величину аксиального офсета [3, с. 19–27].

**Постановка задачи.** Таким образом, целью работы является сравнительный анализ традиционных программ регулирования мощностью энергоблока (программы с постоянным давлением пара во втором контуре ( $P_s = \text{const}$ ), с постоянной средней температурой теплоносителя в 1-м контуре ( $t_{cp} = \text{const}$ )) в маневренном режиме, с точки зрения аксиального офсета.

**Изложение основного материала исследования.** Украинские энергоблоки АЭС работают на энергосистему с большим количеством потребителей электроэнергии. Потребление энергосистемы довольно скачкообразно, это связано с различными потребностями электрической энергии, которые зависят от сезона, дня недели, а также времени суток. По сути, единственным источником информации о величине несоответствия выработки электроэнергии её потреблению является отклонение частоты в энергосистеме от её номинального значения, равного  $50 \pm 0,1$  Гц.

Поэтому для поддержания баланса вырабатываемой электроэнергии и потребления энергосистемы используют три вида регулирования мощности объединённой энергосистемы. В сезонном регулировании принимают участие гидроэлектростанции, а для недельного и суточного регулирования используют энергоблоки ТЭС. Однако ситуация на энергорынке Украины такова, что энергоблоки АЭС начинают привлекать для недельного и суточного маневрирования [2, с. 128–139].

Переход АЭС на работу в манёвренном режиме является устоявшейся мировой практикой. К примеру, Франция, где сегодня на АЭС эксплуатируются 58 энергоблоков, ещё с 1976 года начала этот процесс для энергоблоков с мощностью 900 МВт. А вот что касается украинской практики, то Госатомрегулирования согласовали работу в манёвренном режиме только в 2015 году. Но эксперименты эксплуатации блоков (100–75–100% по электрической мощности, что примерно соответствует 100–85–100% по тепловой мощности активной зоны) ведутся уже давно, с конца 1990-х. В Украине в них были задействованы блоки № 5 ЗАЭС и № 2 ХАЭС. Велись подобные работы и в России, в частности на блоке № 1 Ростовской АЭС.

Энергоблоки с ВВЭР-1000 проектировались для работы только в базовом режиме, поэтому вопрос маневрирования энергоблоками на сегодняшний день является острым, а решение неоднозначно и требует длительных и всесторонних испытаний, а также, очевидно, финансовых затрат на модернизацию и дополнительные ремонтные работы. Любая цикличность нагружения оборудования усиливает эффект износа, а значит, часть вспомогательного оборудования придется менять чаще.

Тепловую мощность  $Q$  обычно задают и оценивают не в абсолютных, а в относительных единицах (в долях или процентах номинальной тепловой мощности реакторной установки  $Q_{ном}$ ), т. е. безразмерной величиной  $Q_{\%} = Q/Q_{ном}$ . Исходя из этого, тепловую мощность, отводимую от АКЗ реактора теплоносителем первого контура, можно с достаточной точностью определить по формуле:

$$Q = Q_{\%} \cdot Q_{ном} = G_1 \cdot C_1 \cdot (T_{вых} - T_{вх}) \quad (1)$$

В установившемся режиме можно с достаточной точностью считать, что температура теплоносителя на выходе/входе АКЗ совпадает с усреднённой температурой на входах/выходах парогенераторов. В реакторах ВВЭР расход теплоносителя первого контура поддерживается постоянным ( $G_1 = const$ ). При номинальной тепловой мощности относительная тепловая:  $Q_{\%} = 1$ . Теплоемкость теплоносителя первого контура в

сравнительно небольшом интервале изменения температуры также с достаточной точностью можно считать постоянной ( $C_1 = const$ ). Поэтому

$$Q_{ном} = G_1 \cdot C_1 \cdot \Delta T_{ном}, \quad (2)$$

где  $\Delta T_{ном}$  – номинальная разность температур теплоносителя на входе и выходе активной зоны реактора при номинальной тепловой мощности. Значение этой величины регламентировано проектом реакторной установки. Из формул (1) и (2) получим:

$$Q_{\%} = \frac{T_{вых} - T_{вх}}{\Delta T_{ном}}. \quad (3)$$

Таким образом, относительная тепловая мощность реактора определяется только разностью температур теплоносителя ( $T_{вых} - T_{вх}$ ), но не самими температурами.

Тепло, отводимое от АЗ реактора, передается теплоносителю второго контура в парогенераторе. Пренебрегая потерями теплоты (в окружающую среду, с протечками водой промконтура) и теплотой, вносимой ГЦН, получим:

$$Q_{\%} \cdot Q_{ном} \approx K_{нз} \cdot S_{нз} \cdot (T_1 - T_2). \quad (4)$$

Коэффициент теплоотдачи и площадь теплообмена  $K_{нз}$  и  $S_{нз}$  не зависят от тепловой мощности, температура кипящей в ПГ воды  $T_2$  равна температуре насыщения во втором контуре  $T_{нас}$  при заданном давлении  $P_2$ . Причем  $P_2$  незначительно отличается от давления пара в главном паровом коллекторе  $P_{гпк}$ . Кроме того, можно считать, что средняя температура теплоносителя первого контура в парогенераторе является

$$T_1 \approx 0.5(T_{вых} + T_{вх}), \quad (5)$$

из чего следует, что при номинальной тепловой мощности:

$$Q_{ном} \approx K_{нз} \cdot S_{нз} \cdot \Delta T_{ном}, \quad (6)$$

где  $\Delta T_{ном} = T_1 - T_{нас}$  соответствует регламентированной проектом реакторной установки разности температур  $T_1 - T_{нас}$  при номинальной тепловой мощности. Из (4) и (6) получим:

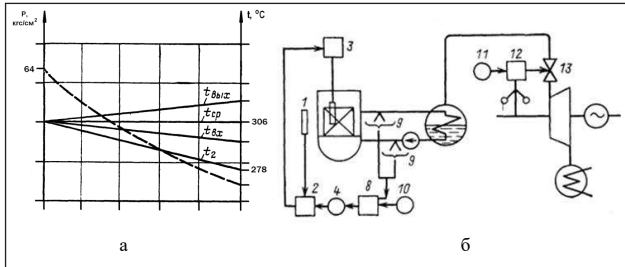
$$Q_{\%} \approx \frac{T_1 - T_{нас}}{\Delta T_{ном}}. \quad (7)$$

Таким образом, четыре параметра ( $\Delta T_{вых}$ ,  $\Delta T_{вх}$ ,  $\Delta T_1$ ,  $\Delta T_{нас}$ ), характеризующих тепловую мощность, связаны тремя уравнениями – (3), (5) и (7), поэтому для одного из них зависимость от тепловой мощности может быть выбрана заранее, после чего для трёх остальных параметров эта зависимость однозначно определяется приведёнными уравнениями.

В случае реализации программы регулирования  $T_1^{сп} = const$  значения  $T_{вых}$ ,  $T_{вх}$ ,  $T_{нас}$  и  $P_2$  изме-

няються, в залежності від потужності, як зображено на рис. 1а.

При підвищенні потужності енергоблока  $T_{\text{вх}}$  збільшується, а  $T_{\text{вх}}$  зменшується і навпаки, при цьому  $T_{\text{сп}}$  зберігається незмінною. Схема регулювання по даній програмі має вигляд, показаний на рис. 1б.



**Рис. 1. Програма з постійною середньою температурою теплоносія першого контура ( $T_{\text{сп}} - \text{const}$ ): а – залежність технологічних параметрів реактора ВВЕР-1000 від потужності; б – схема регулювання**

Регулювання ядерної енергетичної установки забезпечує система групового і індивідуального регулювання ОР СУЗ РУ, переміщуюча регулюючу групу поглинаючих зборок в активній зоні. Виконання управляючих функцій здійснюється по удосконаленим алгоритмам управління полем енерговиділення активної зони. ПТК СГІУ включає в себе силовий управління приводами ОР СУЗ, контроль їх положення, захисти, прийом і обробку команд захисти, контроль і діагностування стану технічних і програмних засобів, а також взаємодія з оператором при допомозі індикації в цифровому вигляді і на панелі о поточному стані груп, обраних для ручного і автоматичного регулювання, а також ключом «групове управління». Силовий управління реалізує головне (робоче) і допоміжне (при русі вниз) групи, включені в проектну послідовність, як при ручному груповому управлінні, так і в режимі автоматичного групового управління від АРМ-5С. АРМ-5С, в свою чергу, має два регулятори: РРН – регулятор нейтронної потужності, працює в режимі «Н»; РРТ – регулятор теплотехнічного параметра, працює в режимах управління «Т» і «С». В РРТ передбачена гнучка негативна зворотна зв'язь по рівню нейтронної потужності через групу елементів, динамічні характеристики якої відповідають реальному диференціюючому ланці. РРН разом з виконавчими механізмами,

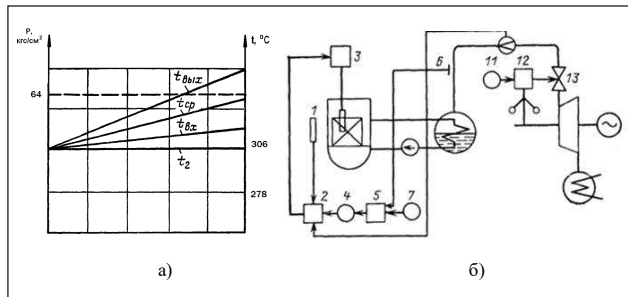
переміщуючими регулюючі органи робочої групи, розглядалися розробниками як інтегральний регулятор, РРТ разом з виконавчими механізмами – як пропорційно-інтегральний регулятор. АРМ-5С підтримує нейтронну потужність в діапазоні 3–110%  $N_{\text{ном}}$  ( $\pm 2\%$  від задання), а тиск во второму контурі 57–67 кгс / см<sup>2</sup> ( $\pm 0.5$  кгс / см<sup>2</sup>). Але слід врахувати блокування регулятора і роботу частотного коректора: заборони на збільшення потужності при 102% від  $N_{\text{ном}}$ , дії ПЗ-2, а також заборони на зменшення потужності реактора при зменшенні тиску в першому контурі до 154 кгс / см<sup>2</sup> і менше. Отже, для автоматизації даного процесу існуючий АРМ-5С потребує розробку спеціальних модифікацій з метою успішної реалізації даної програми регулювання.

Така програма забезпечує найкращі умови експлуатації технологічного обладнання першого контура, оскільки при зміні потужності середня температура і, отже, об'єм теплоносія зберігаються, а зміна  $T_{\text{вх}}$  і  $T_{\text{вх}}$  мінімальні, порівняно з іншими програмами. За рахунок цього спрощуються умови роботи трубопроводів, насосів, компенсатора тиску, а також з допомогою СУЗ можна запобігти виникненню ксенонових коливань. К позитивному результату можна віднести малу інерційність РУ і швидкість переміщення регулюючих груп становить 20 мм/с.

Однак при реалізації даної програми збільшення потужності реактора супроводжується зменшенням тиску, насиченого пари во второму контурі більш ніж на 30%, отже, відбувається зниження температури пари, порівняно з тем номінальним значенням, на яке розрахована турбіна. Основним недоліком даної програми регулювання є процеси, що ставлять під сумнів безпеку. При русі поглинаючих стержнів СУЗ в оболонці ТВЭЛів виникають тепломеханічні напруження, значення яких можуть перевищити допустимі межі, це може призвести до їх розгерметизації.

Розглянемо статичну програму зміни параметрів при постійній температурі насичення во второму контурі ( $T_2 = T_{\text{нас}} = \text{const}$ ). Постійність температури підтримується за рахунок постійного тиску пари во второму контурі ( $P_2 = P_{\text{тк}} = \text{const}$ ). Залежність технологічних параметрів від потужності показана на рис. 2а.

Схема регулювання по даній програмі мають вид, показаний на рис. 2б.



**Рис. 2. Програма з постійним тиском во второму конурі ( $P_2 = const$ ): а – залежність технологічних параметрів реактора ВВЕР-1000 від потужності; б – схема регулювання**

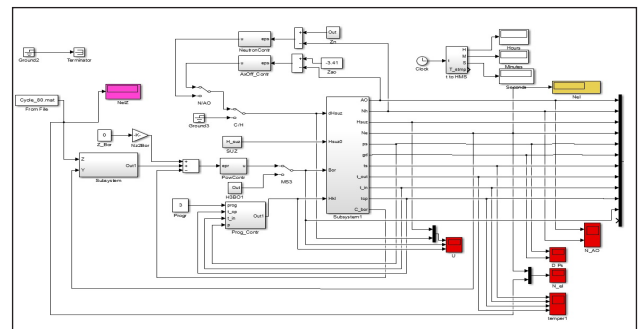
Підтримання ( $P_2 = P_{пнк}$ ) на заданому рівні ТА забезпечує електрогидравлічна система регулювання (ЕГСР). Основним її звеном являється шкаф управління системи регулювання турбіни (ШУ СРТ). Сигнал управління на закриття (откриття) РК змінює ток управління ЕМП і сміщує відсічний золотник ЕГП, що приводить до зменшення (збільшення) тиску масла в камері над ОЗ, відповідно, переміщенню поршня сервомотора і РК на закриття (откриття). Таким образом, СРТ в режимі «РД-1» регулює тиск пари в ГПК. ЕГСР реалізує управління ТА згідно максимальним і мінімальним обмеженням по тиску ( $65\text{--}58 \text{ кгс / см}^2$ ).

Автоматичне включення режиму «РД-1» відбувається при наявності сигналу від АРМ-5С «Режим реактора Н», «АРМ откл.», а також «ПЗ-1», «УПЗ-1 (2, 3)» із схем СУЗ. Функціонування АРМ-5С і ЕГСР взаємопов'язані. Дані об установленному режимі передаються від АРМ-5С в АСУТ, яка відповідним чином змінює своє функціонування: при роботі АРМ-5С, в режимах «Т» або «С» знаходиться в стережущому режимі (знижує потужність турбіни, якщо тиск в паровому колекторі зменшується, по порівнянню з заданим), а при роботі в режимі «Н» або відключенні регулятора від управління реактором забезпечує підтримку заданого тиску в паровому колекторі турбіни.

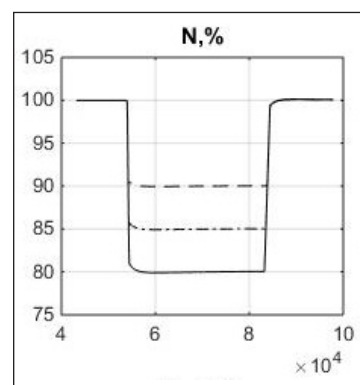
При реалізації даної програми регулювання потужності за рахунок того, що при будь-якій тепловій потужності тиск пари на вході турбіни залишається постійним і рівним проектному значенню, на яке турбіна розрахована, її термічний КПД має максимальне значення, по порівнянню з раніше розглянутою програмою. Крім того ж контролювати тиск

проще, ніж середню температуру води, в гарячих і холодних нитках петель першого контуру. Зменшуються також динамічні похибки регулювання, оскільки при коливаннях електричного навантаження тиск пари в ГПК змінюється значно швидше, ніж температура теплоносія в першому контурі. Слід врахувати, що при переході до цієї програми з збільшенням теплової потужності росте і середня температура теплоносія в першому контурі, змінюється об'єм і, відповідно, підвищуються вимоги до конструкції і роботі компенсатора тиску. Ужесточаються умови роботи обладнання і трубопроводів першого контуру, оскільки зміна температури  $T_{ввх} = 44^\circ\text{C}$  виявляється значно більшою, ніж в попередній програмі.

По уже відомій моделі управління енергоблоком проведено аналіз розглянутих програм при суточному маневруванні ( $100\%\text{--}(90\%\text{--}85\%\text{--}80\%\text{--}80\%\text{--}100\%$ ), модель зображена на рис. 3. Отримані графіки зміни потужності по програмам регулювання приводяться на рис. 4.



**Рис. 3. Модель управління енергоблоком реалізована в середі Matlab**



**Рис. 4. Графік зміни потужності по програмам регулювання**

Для більш достовірного результату в модель включена система борного регулювання. Її технологія така, що монотонне введення і виведення борної кислоти здійснюється

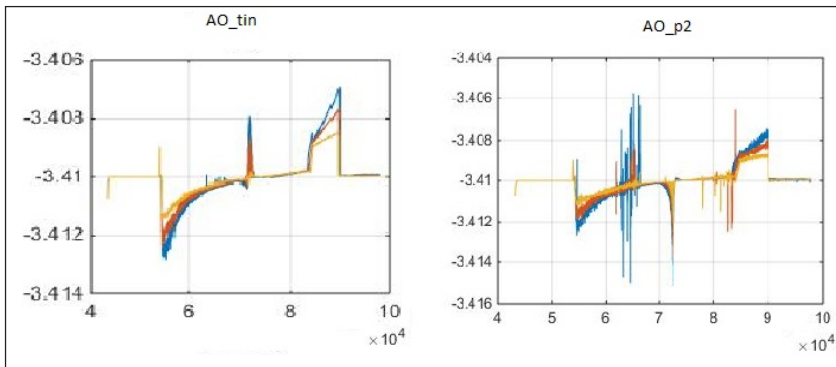


Рис. 5. Изменение АО при рассматриваемых режимах

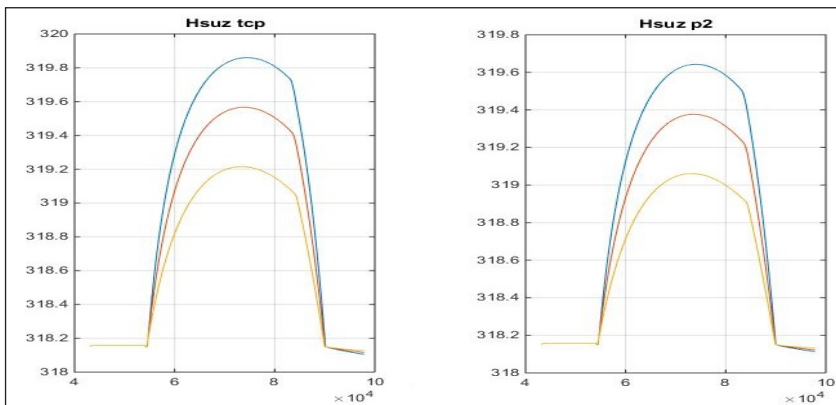


Рис. 6. Амплитуды перемещения ОР СУЗ

путём разбавления теплоносителя или дистиллятом, или концентрированным раствором борной кислоты. В работах Р.Б. Медведева, О.В. Сангинова [5, с. 2956] и С.С. Аниканова, В.Г. Дунаева, В.И. Митина [6, с. 18] приведены результаты исследования системы автоматического регулирования концентрации борной кислоты в теплоносителе первого контура АЭС.

Сравнительным критерием выбран аксиальный офсет, характеризующий равномерность энерговыделения по высоте активной зоны реактора, следовательно, и его устойчивость. Неравномерность нейтронного поля реактора снижает экономические показатели работы РУ и в некоторых случаях может привести к возникновению предаварийных и аварийных ситуаций [7, с. 252–257; 8, с. 231–233].

На рис. 5 наблюдаем графики изменения АО при рассматриваемых программах регулиро-

вания с постоянной средней температурой теплоносителя в первом контуре ( $t_{cp} = \text{const}$ ) и с постоянным давлением пара во втором контуре ( $P_s = \text{const}$ ). С точки зрения стабильности АО можно сделать вывод, что при режиме П2 наблюдаются меньшие по количеству и величине отклонения от оптимальных значений, чем при П1. Но данное суждение не может выступать единственным аргументом при сравнении программ, т. к. в П2 имеется суммарно большее количество колебаний АО на протяжении всего манёвра. Поэтому мы предлагаем сравнить амплитуды перемещения регулирующей группы СУЗ в ходе манёвра по рассматриваемым программам для определения лучшей с точки зрения напряжений на границе движения ОР СУЗ, т. к. недопустимые значения перемещений могут привести к разрушению оболочки ТВЭЛ по механизму КРН, что ставит под вопрос безопасность.

В результате анализа графиков, приведённых на рис. 6, можно сделать вывод, что для программы с постоянным давлением пара во втором контуре управляющее воздействие менее интенсивное, чем для программы со средней температурой теплоносителя в первом контуре, следовательно, если сравнительным критерием принимать амплитуду перемещения ОР СУЗ, то первая – наихудшая, а вторая – наилучшая.

**Выводы.** Из полученных экспериментальных графиков и проведённого сравнительного анализа можно сделать вывод, что обе программы регулирования удовлетворяют критериям допустимых значений изменения АО и амплитуд перемещений ОР СУЗ, следовательно, имеют право быть использованы на АЭС с реактором ВВЭР-1000.

#### Список литературы:

1. Беркович В.М., Горохов В.Ф., Татарников В.П. О возможности регулирования мощности энергосистемы с помощью атомных электростанций. Теплоэнергетика. 1974. № 6. С. 16–19.
2. Максимов М.В. Метод оценки эффективности алгоритма манёвра мощностью энергоблока с реакторами ВВЭР-1000. Известия вузов. Серия «Ядерная энергетика». 2008. № 4. С. 128–139.
3. Фощ Т.В., Максимов М.В., Никольский М.В. Анализ влияния методов управления мощностью энергоблока с водо-водяным реактором на аксиальный офсет. Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2014. № 2 (8). С. 19–27.

4. Современные технологии управления: монография: в 2 т. / под общ. ред. С.В. Куприенко; Sworld. Одесса: Куприенко С.В., 2012. 179 с.

5. Медведев Р.Б., Сангінова О.В. Оптимальне керування процесом зміни концентрації борної кислоти в теплоносії першого контуру АЕС з ВВЕР-1000. Наукові вісті Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». 2002. № 2 (22). С. 22.

6. Аниканов С.С., Дунаев В.Г., Митин В.И. Управление энергораспределением ВВЭР-1000 в маневренном режиме. Атомная энергия. 1993. Т. 75. № 1. С. 3–8.

7. Управление аксиальным распределением поля энерговыделения в активной зоне ВВЭР-1000 при переходных процессах / А.А. Коренной, С.Н. Титов, В.А. Литус, О.В. Неделин. Атомная энергия. 1998. Т. 88. № 4. С. 252–257.

8. Филимонов П.Е., Аверьянова С.П. Поддержание равновесного офсета – эффективный способ подавления ксеноновых колебаний в ВВЭР-1000. Атомная энергия. 2001. Т. 90. № 3. С. 231–233.

### **ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ПРОГРАМ РЕГУЛЮВАННЯ ПОТУЖНОСТІ ДЛЯ ДОБОВОГО МАНЕВРУВАННЯ ЕНЕРГОБЛОКУ АЕС З РЕАКТОРОМ ВВЕР-1000**

*В енергосистемі України існує невідповідність між виробленням і споживанням електричної енергії протягом добового циклу. Сумарна частка установок, призначених для регулювання навантаження енергосистем, дуже мала, тому актуальною є адаптація діючих енергоблоків АЕС до нових специфічних умов шляхом створення автоматизованої системи управління потужністю енергоблоку в маневрених режимах. У роботі розглянуто порівняльний аналіз традиційних програм регулювання потужності енергоблоку (програми з постійним тиском пари в другому контурі ( $P_s = \text{const}$ ) і з постійною середньою температурою теплоносія в першому контурі ( $t_{cp} = \text{const}$ )) в маневреному режимі, з погляду стійкості реактора. Аксиальний офсет характеризує рівномірність енерговиділення за висотою активної зони реактора, а отже, і його стійкість. Нерівномірність нейтронного поля реактора знижує економічні показники роботи реакторної установки й у деяких випадках може призвести до появи передаварійних та аварійних ситуацій.*

**Ключові слова:** регулятор, програма регулювання, потужність, енергоблок, аксиальний офсет.

### **INVESTIGATION OF REGULATION PROGRAMS, FOR DAILY MANEUVERING OF THE NPP UNIT WITH THE WVER-1000 REACTOR**

*There is a discrepancy between the generation and consumption of electric energy during the daily cycle in Ukraine's power grid. The total share of installations intended to regulate the load of the power system is very small, therefore the adaptation of the operating power units of the nuclear power plant to the new specific conditions is urgent by creating an automated power control system in the power unit in maneuvering modes. In this paper, a comparative analysis of the traditional power control programs of the power unit (programs with constant steam pressure in the second circuit ( $P_s = \text{const}$ ) and the constant average temperature of the heat carrier in the first circuit ( $t_{av} = \text{const}$ )) is considered in the manual mode in terms of reactor stability. The axial offset characterizes the uniformity of energy release over the height of the active zone of the reactor, and, consequently, its stability. The unevenness of the neutron field of the reactor reduces the economic performance of the reactor plant and in some cases can lead to pre-emergency and emergency situations.*

**Key words:** controller, control program, power, power unit, aksial office.



УДК 37.18.43(082)

**Кисельов Г.Д.**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Миرونенко С.С.**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## ІНФРАСТРУКТУРА ПЛАТФОРМИ ЕЛЕКТРОННОЇ ПІДТРИМКИ НАВЧАЛЬНОГО ПРОЦЕСУ

*Дистанційне навчання, як і будь-яка інша технологія освіти або підвищення кваліфікації, містить три складові частини: організація процесу навчання, навчальний контент, моніторинг якості освіти. Таким чином, система дистанційного навчання або Learning Management System (LMS) – це сукупність програмних застосувань, які автоматизують всі ці складники дистанційної освіти. У статті розглянуто важливість застосування LMS поруч із традиційним процесом навчання. Розглянуто стандартизацію LMS, можливість і необхідність імплементації технології Big Data, а також технологічну схему процесу дистанційного навчання. Розглянуто стек технологій, що необхідний для побудови засобів обробки даних в системі, а також їх можливості щодо надання результуючих даних для моніторингу знань студентів дистанційної освіти. Розглянуто сильні та слабкі місця технологій обробки та збереження даних. Вказано на необхідність застосування в LMS методів аналізу великих масивів слабо структурованих даних і побудови архітектури повного аналізу даних. Наведено приклади застосування технології Big Data загалом і приклади продуктів сімейства Big Data, що можуть бути застосовані для побудовання аналітичного складника в LMS.*

**Ключові слова:** LMS, Big Data, Hadoop, NoSQL, Data Lake, Map Reduce, Framework, змішане навчання, традиційні дані, навчальний процес.

**Постановка проблеми.** Відомо, що засвоєння готових знань – це не ціль, а всього лише один із засобів інтелектуального розвитку людини. Педагогічні системи сьогодні не мають права, як в минулому сторіччі, будувати навчання на засвоєнні суми готових знань, тому практично у всіх розвинених країнах зроблений акцент на навчання умінню самостійно добувати потрібну інформацію, відокремлювати проблеми і шукати шляхи їх раціонального рішення, уміти критично аналізувати одержувані знання і застосовувати їх для вирішення нових задач.

**Постановка завдання.** Розглянути важливість застосування LMS поруч із традиційним процесом навчання. Розглянути стандартизацію LMS, можливість і необхідність імплементації технології Big Data, а також технологічну схему процесу дистанційного навчання. Розглянути стек технологій, що необхідний для побудови засобів обробки даних в системі, а також їх можливості щодо надання результуючих даних для моніторингу знань студентів дистанційної освіти. Виявити сильні та слабкі місця технологій обробки та збереження даних.

**Виклад основного матеріалу.** Ідеальна система навчання має виконувати наступні функції [1]:

- сформувати у студента бажання вчитися і визначити ціль навчання;
- підтримувати мотивацію до навчання і творчої діяльності;
- забезпечити кожного студента індивідуально-адаптованими навчальними матеріалами;
- дати кожному студенту можливість вчитися за індивідуальним графіком;
- безупинно оцінювати результативність навчання.

Зрозуміло, що мова йде про ідеалізовану систему навчання, якою до останнього часу вважалась традиційна система. Однак, аналізуючи ці завдання, можна дійти висновку, що більшість з цих задач можна виконати, обравши за основу метод дистанційного навчання (е-навчання). Так, сформувати в студента бажання вчитися і визначити ціль навчання можна, використавши підхід ділової гри. Для підтримки мотивації можна ввести систему проміжних оцінок. Індивідуальний графік навчання надається інструментарієм дистанційного навчання. Досвід існування дистанційного навчання в вищій школі виявив цілий ряд його недоліків. Це підвищені вимоги до якості дистанційних навчальних курсів, складність, а в деяких

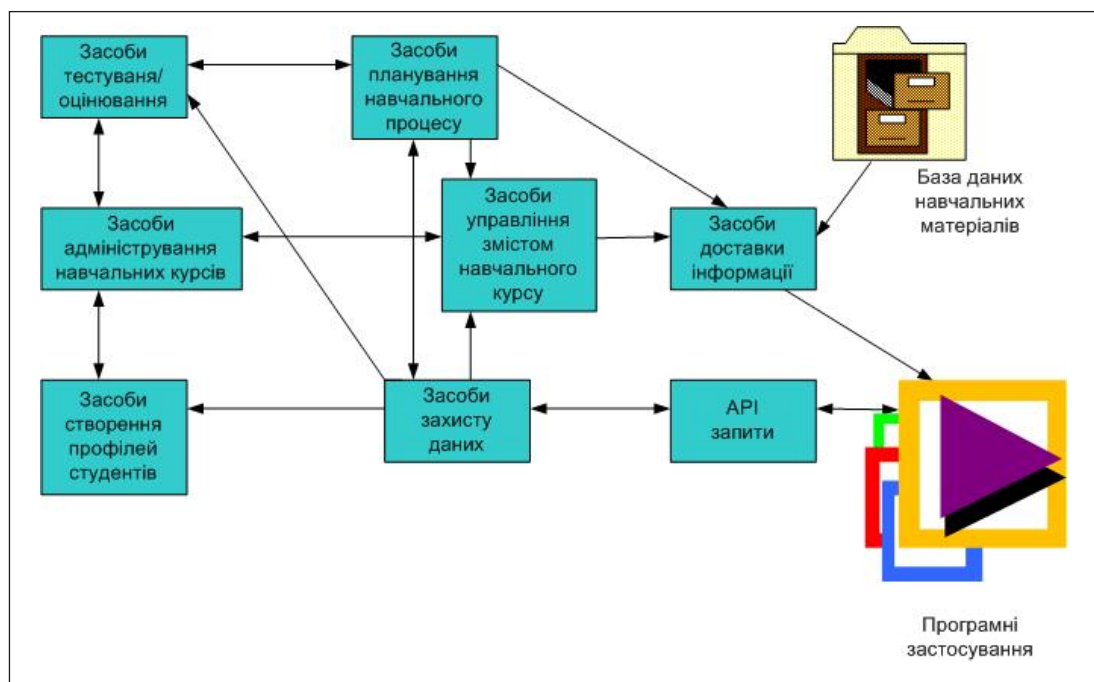


Рис. 1. Архітектура платформи е-навчання

випадках неможливість проведення практичних та лабораторних занять, складність дистанційного контролю знань. Новим підходом вирішення проблем навчання є використання технології змішаного навчання, коли поєднуються традиційна форма навчання і дистанційне навчання. Змішане навчання передбачає елементи самостійного контролю студентом освітнього маршруту, часу, місця і темпу навчання, а також інтеграцію досвіду традиційного навчання і дистанційного. Ефективність будь-якого виду навчання, особливо дистанційного і змішаного, залежить від його інструментальної (програмно-системної) підтримки або платформи електронного навчання [2].

#### Схема процесу навчання

Класична реалізація платформи е-навчання на рівні сервера включає засоби керування дистанційним навчанням (накопичення інформаційних ресурсів, розподіл прав доступу до навчальної інформації, контроль процесу навчання і засвоєння знань) і базу навчальних матеріалів (рис. 1). На клієнтському рівні створюється взаємодія користувачів (студентів і викладачів) з сервером [1].

Таке середовище має містити наступні компоненти:

- керування навчальним процесом, тобто планування і контроль навчання;
- контроль (діагностики) рівня підготовки студента;
- комплекс автоматизованих навчальних курсів, що охоплюють усі необхідні теми навчання;

- персональний кабінет студента;
- персональний кабінет викладача навчальної дисципліни;
- персональний кабінет викладача-автора навчальних матеріалів дисципліни;
- розподілені мережеві репозиторії навчальних матеріалів;
- експертну систему контролю і діагностики рівня знань.

Погоджена робота перелічених компонентів забезпечується системами дистанційного навчання (DLS – Distance Learning System).

Навчальні інформаційні ресурси створюються, починаючи від найпростіших текстових файлів і гіпертекстових систем допомоги і кінчаючи мультимедійними навчальними курсами, електронними підручниками, відеоматеріалами і засобами контролю / самоконтролю знань. Ефективність засобів комп'ютерного дистанційного навчання, що дозволяє підвищити «розуміння» проектувальниками інструментальних середовищ проектування, визначається насамперед наявністю продуманих LMS (Learning Management System) програмних засобів керування процесом навчання, що є невід'ємною частиною DLS. Під час створення LMS враховують досягнення технологій дистанційного навчання в класичних установах освіти, що закріплюються в стандартах. Розроблювачі LMS використовують, як правило, специфікацію IEEE LTSC P1484 комітету зі стандартів технологій навчання (LTSC – Learning

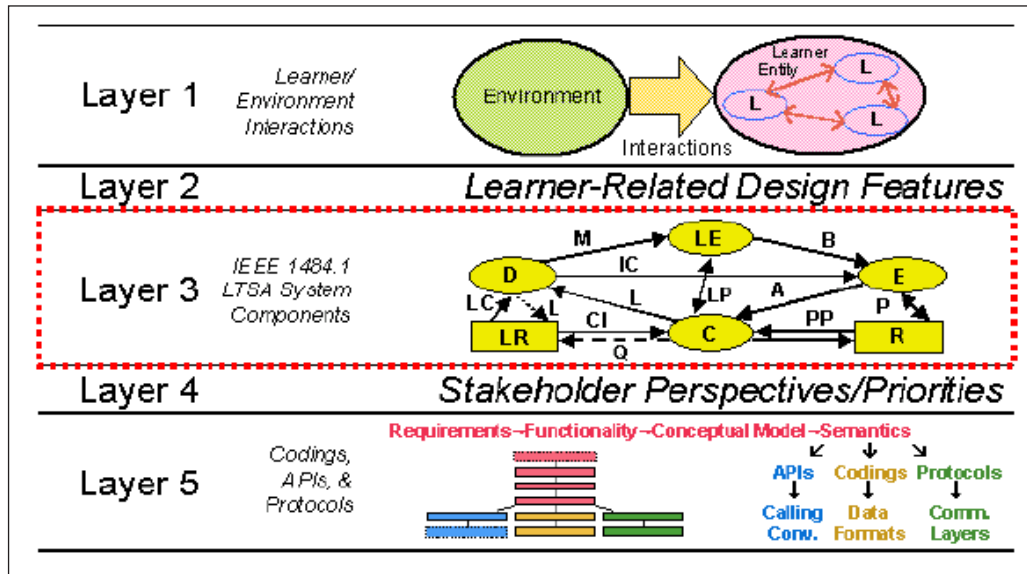


Рис. 2. П'ятирівнева модель системи дистанційного навчання по специфікації LTSA

Technology Standards Committee). Навчальні технології дистанційного навчання розвивають і вдосконалюють якість освіти, що здобувається, на основі методологічних стандартів університетської освіти, зберігаючи індивідуальність і авторитет (стиль навчання / рівень, що може прирівнюватись до бренду) вузу.

**Стандартизація архітектури систем дистанційного навчання**

Відповідно до специфікацій IMS для використання в освітній діяльності комітетом IEEE LTSC (P1484 – Learning Technology Standard Committee) рекомендована типова архітектура систем дистанційного навчання LTSA (Learning Technology Systems Architecture).

Стандарт IEEE P1484 охоплює достатньо широке коло систем зазвичай відомих як навчальні системи, тренінгові системи, системи комп'ютерного тестування, інтелектуальні навчальні системи. Стандарт є керівництвом для розвитку конфігурації інформаційних систем освітнього призначення, а також комунікаційних протоколів і методів взаємодії за спільної роботи в процесі навчання.

У системах, що реалізують технології навчання, виділяють п'ять рівнів опису архітектури (рис. 2) [1]:

Рівні опису системи дистанційного навчання:

*Рівень 1.* Взаємодія Студент– навколишнє середовище.

*Рівень 2.* Особливості проектування, пов'язані зі студентами.

*Рівень 3.* IEEE 1484.1, компоненти LTSA-системи.

*Рівень 4.* Перспективи і пріоритети учасників навчального процесу.

*Рівень 5.* Операційні компоненти і протоколи взаємодії.

*Рівень 1.* Виділяються два елементи – об'єкт навчання і середовище навчання. Розглядаються питання впливу середовища навчання на студента з позицій передачі знань, обміну інформацією за взаємодії з повчальним середовищем, представленим у вигляді Інтернету, лабораторії, комп'ютерів, бібліотек, книг, мультимедіа файлів, газет, телебачення, батьків, педагогів. Спільна робота студентів представляється у вигляді внутрішньої взаємодії, аналогічної взаємодії розподілених баз даних в процесі створення єдиної бази даних. Середовище навчання є чинником впливу на студента в процесі взаємодії.

*Рівень 2.* Формулюються завдання, пов'язані з особливостями інтерфейсу освітньої технологічної системи в процесі взаємодії зі студентами. Водночас акцентується увага на природі людини, що відрізняє її від комп'ютера.

*Рівень 3.* Найбільш інформативною частиною архітектури є 3-й рівень (компоненти системи), на якому аналізується система дистанційного навчання з позицій інформаційних технологій.

*Рівень 4.* Описуються інформаційні потоки між окремими компонентами системи дистанційного навчання залежно від моделей і технологій навчання. У LTSA Specification розглянуто 120 [1] варіантів архітектурних рішень, що служить, на думку авторів, доказом універсальності запропонованих архітектурних моделей.

*Рівень 5.* Забезпечує взаємодію системи дистанційного навчання, тобто описуються основні елементи, відповідальні за її взаємодію. Це насамперед інтерфейси прикладних програм (застосовань) – API (Application Program Interface), формати даних і протоколи обміну даними.

Кожна система дистанційного навчання, згідно зі специфікацією LTSA, має підтримувати чотири процеси, два сховища даних (репозиторію) і десять інформаційних потоків.

Процеси (Processes):

– виявлення знань студента (основним об'єктом цього процесу є студент (Learner entity));

– оцінка знань (Evaluation);

– координування – управління навчанням (основним об'єктом цього процесу є викладач-інструктор) (Coach);

– формування і доставка учбових матеріалів (процес доставки) (Delivery).

Сховища даних (Stores):

– записи успішності студента (база даних з результатами відповідей і успішності студентів) (Learner records);

– ресурси навчання (репозиторій з матеріалами для навчання) (Learning resources).

Інформаційні потоки між процесами і сховищами даних (Flows):

– спостереження за поведінкою учня (Behavior);

– інформація про тестування (Assessment);

– інформація про успішність (Preferences);

– запити (Query);

– інформаційні каталоги (Catalog Info);

– посилання (адреси) навчальних матеріалів (Locator);

– контент (навчальні матеріали) (Learning Content);

– мультимедіа (Multimedia);

– контекст взаємодії (Interaction Context);

– стилі, стратегії і методи навчання (Learning Preferences).

Процес навчання з використання СДН (Систем дистанційного навчання, LMS) включає наступні етапи [1]:

1. Стилi, стратегії і методи навчання обговорюються серед студентів і осіб, які зацікавлені в їх навчанні (керівники, спонсори, батьки та інші), і спільно виробляється найбільш переважна стратегія навчання.

2. Студент вивчає матеріал. В ході вивчення його знання постійно оцінюються автоматизованими засобами тестування з урахуванням персональних особливостей і вибраної стратегії навчання.

3. Після закінчення вивчення розділу або дисципліни знання студента оцінюються в процесі атестації або як сумарна тестова оцінка за виконання поточних завдань.

4. Інформація про виконання завдань запам'ятовується в базі даних (історія навчання).

5. Викладач-інструктор регулярно проглядає оцінки виконаних поточних завдань студентів, результати поточної атестації студентів, попередні атестації і коректує цілі навчання для кожного студента відповідно до його успіхів.

6. Викладач-інструктор досліджує ресурси навчання, набори тестів, питань й інформаційні каталоги і формує контент найбільш відповідний для конкретного студента.

7. Викладач-інструктор читає розділи навчальних матеріалів (використовуючи відповідні посилання) з інформаційних каталогів, визначає місцезнаходження вказаних ресурсів, передає інформацію про місце їх знаходження в службу доставки навчальних матеріалів і таким чином формує план навчання, орієнтований на конкретного студента.

8. Служба доставки дістає необхідний навчальний контент з БД за допомогою посилань і перетворює його в мультимедійну інтерактивну презентацію для конкретного студента.

На ринку представлені такі Системи дистанційного навчання, як WebCT, Learning Space, Lon-CAPA, Moodle та інші [8]. Вони відповідають вимогам стандартів, дозволяють створювати навчальні ресурси і контролювати успішність навчання.

Проте оцінювання тільки з боку LMS не достатні для оцінювання студента загалом, оскільки система враховує тільки активність в межах самої системи, не враховуючи оцінки за лабораторні роботи, контрольні тощо. Проте, якщо поєднати оцінки із системи та інші оцінки, можна отримати шлях до моніторингу успішності студента та якості начального матеріалу. Звичайно ж це потребуватиме деякого алгоритмічного підходу, який буде надавати послуги із побудови моделі успішності студента, проте для того щоб реалізувати цю систему, треба зробити деякі технічні рішення, необхідно спроектувати архітектуру, що буде містити в собі і LMS, і компоненти обробки даних та компоненти, що будуть організовувати процес обробки для даних.

Проте постає питання, яким чином отримувати генеровані дані, зберігати їх, аналізувати? Відповіддю на це питання буде система, що поєднає Big Streams, Big Data, Big Systems та логіку обробки.

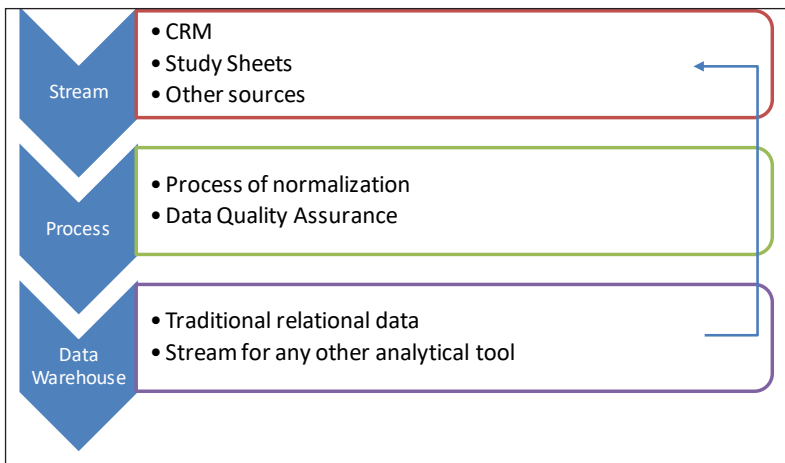


Рис. 3. Типовий процес обробки та аналізу даних

Результатом буде архітектура, що зможе поєднати велику кількість релевантних даних, зберігати їх та аналізувати. На перший погляд, задача потребує великих потужностей обчислювальної техніки, яких деякі наукові установи, на жаль, просто не мають. Проте можна використовувати технології масових паралельних обчислень, що дозволять застосувати ресурси комп'ютерного парку, що має установа, розподіляючи задачі за принципами навантаження.

Таким чином, маємо практичну інженерну задачу, яка потенційно дозволить покращити якість освіти та наукових досліджень за допомогою аналізу даних студента / курсу та виявлення слабких місць за допомогою алгоритмів аналізу. Вирішення цієї задачі полягає у створенні архітектурного рішення [2], що поєднає у собі обробку технології Big Data для аналізу і побудови моделей, що дозволить знаходити у курсах слабкі місця та поліпшувати їх. Для вирішення задачі необхідно обрати технології, що існують на ринку, сформувані технічну потребу для імплементації взаємодії обраних технологій, підключити як потік даних (Stream) базу даних присутньої LMS та написати клієнт-серверний додаток, що буде оброблювати дані, які були зібрані архітектурою. Надалі поверхнево розглянемо, як працюють елементи технологій, що будуть утворювати архітектурне рішення.

Основою для побудови процесу можуть стати технології та їх комбінації, що давно вже використовуються і перевірені часом у середовищі із високою конкуренцією – у бізнесі, тобто перевірені на стабільність за високих навантажень, де ціна помилки дуже висока.

Забезпечення ефективних інструментів та технологій бізнес-аналітики для підприємства є

майже завжди пріоритетним напрямом. Ефективна бізнес-аналітика – від базової звітності до поглибленого аналізу даних та прогнозу аналітики – дозволяє аналітикам даних та бізнес-споживачам отримати висновки з корпоративних даних, які під час переведенні в дію забезпечують вищий рівень ефективності та прибутковості для підприємства.

Традиційні інструменти та технології керування даними та бізнес-аналітики змінюються під впливом Big Data, і тоді з'являються нові підходи, які допомагають користувачам отримати корисну інформацію з Big

Data. Наприклад, фреймворк Hadoop, бази даних NoSQL, Cassandra, Accumulo і масово-паралельні аналітичні бази даних приймають принципово інший підхід до обробки даних, аналітики та Додатків, ніж традиційні інструменти та технології, від таких, як EMC Greenplum, HP Vertica та Teradata Aster Data. Це означає, що підприємства також повинні радикально переосмислити те, як вони підходять до аналізу даних бізнесу.

Застосування великих даних для більшості буде непростою задачею, проте компанії, що застосовують їх, стають більш конкурентно спроможними, а також зменшують час реакції на зміни, оскільки збирають та аналізують дані із декількох місць одночасно. Big Data у поєднанні зі складною бізнес-аналітикою призводить до розуміння поведінки клієнтів та нестабільних ринкових умов, що дає їм можливість робити бізнес-рішення на основі даних набагато швидше та ефективніше, ніж конкурентам.

#### Обробка та аналітика

Для виконання задачі із побудування інфраструктури оцінювання студента необхідно дослідити наявні продукти, що можуть забезпечити процес обробки потоку даних, у тому числі даних із властивостями історичних, поганою структуризацією, чіткою структуризацією логів і тому подібним. Тому розглянемо характерні особливості Big Data та пов'язаного з ними інструментарію.

Зазвичай для обробки даних в аналітичних цілях було достатньо використовувати наступний процес обробки. За звичайного процесу ведення бізнесу підприємства створюють достатньо скромні обсяги структурованих даних зі стабільними моделями даних через такі корпоративні програми, як CRM, ERP та фінансові системи. Інструменти інтеграції даних використовуються

для вилучення, перетворення та завантаження даних з корпоративних додатків та транзакційних баз даних у місце розташування, де відбувається нормалізація якості даних), а дані моделюються в структуровані рядки та таблиці. Модельовані, очищені дані потім завантажуються в корпоративне сховище даних. Ця процедура зазвичай відбувається на регулярній основі – щоденно або щотижня, іноді частіше.

Надалі адміністратори сховища даних створюють і запускають регулярні звіти, які працюють з нормалізованими даними, що зберігаються на сховищі даних. Вони також створюють інформаційні панелі та інші обмежені засоби візуалізації для користувачів.

Тим часом аналітики використовують інструменти аналізу даних, щоб запустити розширені аналітики зі сховища даних або проти зразкових даних, перенесених до локальних даних, через обмеження розміру. Неекспертні аналітики-користувачі виконують базову візуалізацію даних та обмежену аналітику порівняно зі сховищем даних через зовнішні інструменти бізнес-аналітики від постачальників, таких як SAP BusinessObjects та IBM Cognos. Обсяги даних в традиційних сховищах даних не часто перевищують кілька терабайт, оскільки великі обсяги даних займають ресурси сховища та знижують продуктивність.

#### Характер великих даних

Поява веб-сторінок, мобільних пристроїв та інших технологій призвела до істотних змін характеру даних. Великі дані мають важливі відмінні якості, які відрізняють їх від корпоративних «традиційних». Вона не централізована, не структурована, доволі поширена. Зокрема, вона має такі головні риси:

– об’єм – кількість даних, що створюється як всередині підприємства, так і поза локальною мережею – у веб, мобільних пристроях та ІТ інфраструктурах щороку збільшується експоненційно.

– тип – різноманіття типів даних збільшується, включає неструктуровані текстові дані та погано структуровані дані, як-то: дані соціальних платформ, місце розташування, логів тощо.

– швидкість – середня швидкість, за якої формується масив великих даних, та реальна потреба у аналітики реального часу для надання бізнесу цінної інформації із неї зростає завдяки кількості транзакцій та кількості пристроїв в цілому.

– Шляхи генерації Big Data:

– Соціальні мережі та медіа – сотні мільйонів сторінок у соціальних мережах, програмах обміну

повідомленнями, блогах. Кожен пост у соціальній мережі, повідомлення чи оновлення блогу створюють «вихлоп даних» – погано структурованих чи не структурованих даних.

– Мобільні пристрої – на даний момент по всьому світу використовуються більше ніж 5 мільярдів пристроїв. Смартфони та планшети, зокрема, надають мобільний доступ до соціальних мереж, а також збирають та передають дані місцезнаходження.

Традиційні сховища даних та інші інструменти керування даними під час обробки та аналізу великих даних не є ефективними в економічному та часовому аспекті. Зокрема, дані повинні бути організовані в реляційні таблиці – структуровані рядки та стовпці – до того, як традиційне корпоративне сховище даних може його отримати. Через кількість часу та надмірну потужність застосування такої структури до величезної кількості неструктурованих даних є непрактичним. Крім того, для розширення традиційного корпоративного сховища даних для розміщення потенційних петабайт даних можуть вимагатися нереалістичні фінансові інвестиції в нові, часто залежні від постачальника та обладнання. Також може постраждати продуктивність сховища даних через точку замикання для завантаження даних. Тому необхідні нові способи обробки та аналізу великих даних.

Таблиця 1

#### Порівняння Традиційних і не Традиційних баз даних

Традиційні дані	Big Data
Гігабайти	Петабайти та Екзабайти
Централізоване	Розподілений
Структурований	Напівструктурований та неструктурований характер даних
Стійка модель даних	Прості схеми
Складені взаємозв'язки	Майже відсутні взаємозв'язки

#### Підходи до обробки та аналітики

Існує ряд підходів до обробки та аналізу Big Data, але більшість поділяють деякі загальні характеристики, а саме: вони користуються перевагами товарного обладнання, щоб забезпечити масштабні технології паралельної обробки; використовують можливості не реляційних даних для обробки неструктурованих та нечітко структурованих даних; застосовують розширені аналітичні технології та технології візуалізації даних до великих даних для передачі статистики кін-

цевим користувачам. Надалі розглянемо технічні рішення, що присутні на ринку і покликані виконувати обробку даних.

Hadoop – відкритий фреймворк для обробки, зберігання та аналізу великої кількості неструктурованих, розподілених даних. Кластери Hadoop можуть працювати на недорогому фізичному обладнанні, що дозволить маленьким командам не збанкрутитися за раптового збільшення кластеру. Нині це продукт Apache Software Foundation, що означає, що продукт постійно оновлюється великою спільнотою. Фундаментальний концепт Hadoop – замість того щоб опрацьовувати за раз однією машиною один шматок даних, Hadoop розбиває дані на багато частин, щоб опрацьовувати і аналізувати одночасно.

Клієнт має доступ до даних, що не мають довіри, які являються слабо структурованими, наприклад, дані із соціальних мереж та внутрішніх сховищ. Система розбиває дані на частини, що потім завантажуються у файловою систему, що створена із багатьох нод.

Стандартний метод зберігання у Hadoop – Hadoop File System, що створена спеціально для того щоб зберігати великі об'єми неструктурованих даних, при цьому дані не зберігаються у реляційних форматах.

Кожна частина реплікується по декілька разів, а тільки потім завантажуються у систему на випадок, якщо зв'язок із ногою буде втрачений. Головна нода або ж «іменна» (NameNode) працює як посередник, повідомляючи інформацію, як то: доступність вузлів, знаходження даних у кластері, ноди, що відмовили.

Як тільки дані були завантажені, можна починати процедуру MapReduce у відповідному фреймворку. Клієнт подає завдання “Map” – зазвичай запит, написаний на Java, на один із вузлів кластера, що називається Job Tracker. Відстеження роботи посилається на іменний вузол, щоб визначити, які дані йому необхідні для завершення роботи, а також, де знаходиться в кластері розташування даних. Після визначення, Job Tracker подає запит до відповідних вузлів. Замість того щоб повернути всі дані назад до центрального розташування, обробка відбувається на кожному вузлі паралельно. Це істотна характеристика Hadoop.

Коли кожен вузол закінчить обробку заданої роботи, він зберігає результати. Клієнт ініціює роботу “Reduce” через Job Tracker, в якій результати етапу Map зберігаються локалізовано на окремих вузлах, агрегуються, щоб визначити

«відповідь» на початковий запит, а потім завантажуються на інший вузол кластера.

Коли фаза Map-Reduce завершена, оброблені дані готові до подальшого аналізу з боку аналітиків та інших працівників, які мають навички аналізу даних. Аналітики можуть маніпулювати та аналізувати дані за допомогою будь-якої кількості інструментів для будь-якої кількості застосувань, у тому числі для пошуку прихованих фактів та моделей або для створення основи для створення аналітичних додатків, які використовуються користувачами. Дані також можна моделювати та переносити з кластерів Hadoop у наявні реляційні бази даних, сховища даних та інші традиційні інформаційні системи для подальшого аналізу та / або підтримки транзакційної обробки.

Компоненти Хадуп:

– Hadoop Distributed File System: HDFS – стандартне сховище у будь-якій реалізації кластера;

– Вузол Імен (NameNode) – нода у кластері, що надає клієнтові інформацію про розташування даних та працездатність вузлів;

– Job Tracker – вузол, що ініціює та координує MapReduce процеси, обробку даних;

– Slave Node – робочі ноди, що зберігають дані, та оброблюють їх, згідно Job Tracker.

На додаток до вищевказаного, екосистема Hadoop містить багато сумісних проектів. NoSQL Cassandra та HBase можуть зберігати результати MapReduce. Також присутній проект Hive, що дозволяє робити аналітичні моделі у Hadoop.

*Аналіз необхідності застосування Hadoop*

Головною перевагою Hadoop є те, що технологія дозволяє користувачам ефективно обробляти та аналізувати великі обсяги неструктурованих та нечітко структурованих даних, які до цього були недоступні для аналізу. Оскільки кластери Hadoop можуть масштабуватися до екзобайтів даних, підприємства більше не повинні спиратися на вибірккові набори даних, а можуть обробляти та аналізувати всі релевантні дані. Аналітики можуть застосовувати ітераційний підхід до аналізу, постійне вдосконалення та тестування запитів, щоб виявити раніше невідомі факти. Також певним плюсом є відносна мала ціна Hadoop у термінах ціни та інвестицій часу. Розробники можуть безкоштовно завантажити дистрибутив Apache Hadoop і почати експериментувати з ним менш ніж за день.

Недоліком є те, що все ще існує брак розробників Hadoop та аналітиків, а також доволі високі ціни на їх послуги, що робить обмеженим для багатьох підприємств застосування, підтримку та

використання великих кластерів Hadoop. Також Hadoop є пакетною системою, тобто не підтримує обробку та аналіз даних в реальному часі.

#### *NoSQL*

Новий формат зберігання у базі даних NoSQL (Not Only SQL) з'явився, подібно до Hadoop, для обробки великих обсягів багатоструктурних даних. Проте тоді як Hadoop чудово підтримує великомасштабний історичний аналіз пакетного стилю, база даних NoSQL спрямована здебільшого для надання дискретних даних для кінцевих користувачів та автоматизованих додатків великих даних, що зберігаються у великих обсягах багато-структурних даних. Ця можливість, на жаль, відсутня в технології реляційних баз даних, які просто не можуть підтримувати необхідний рівень продуктивності для додатків у масштабі Big Data.

У деяких випадках NoSQL та Hadoop працюють разом. Наприклад, HBase – це популярна база даних NoSQL, модельована за допомогою Google BigTable, яка часто використовується поверх HDFS (розподіленою файловою системою Hadoop), щоб забезпечити низький час затримки та швидкий пошук в Hadoop.

Нині наявні NoSQL БД:

- HBase;
- Cassandra;
- MarkLogic;
- Aerospike;
- MongoDB;
- Accumulo;
- Riak;
- CouchDB;
- DynamoDB

Недоліком більшості баз даних NoSQL є те, що вони знехтували принципом ACID (атомічність, послідовність, ізоляція, довговічність) для надання продуктивності та масштабованості.

*Масово-паралельні аналітичні бази даних.*

Під час побудови системи також треба врахувати фактор внутрішніх порядків інституцій, де вона буде розгортатися, тобто тривалість часу зберігання даних. При цьому зберігати тимчасові файли немає жодної потреби, але файли, що містять лабораторні роботи, курсові роботи тощо – є обов'язковими для зберігання терміном мінімум у декілька років (наприклад у КПІ – три роки), тому необхідно застосувати систему, яка зможе легко бути реконфігурована таким чином, щоб зберігати дані у декількох окремих місцях. Цей інженерний прийом називається sharding (з англ. shard – частина) – процес, коли дані розподіляються за

якоюсь ознакою по декількох серверах. Майже усі сучасні СУБД підтримують таку можливість, але найкраще ця технологія представлена у масово-паралельних аналітичних базах даних.

На відміну від традиційних сховищ даних, масово-паралельні аналітичні бази даних здатні швидко приймати великі обсяги структурованих даних з мінімальним моделюванням і можуть бути розширені для розміщення декількох петабайт, а іноді й екзабайт даних.

Що найголовніше для користувачів, масово-паралельні аналітичні бази даних підтримують результати майже в режимі реального часу для складних SQL-запитів (також називаються інтерактивними можливостями запитів) – помітна відсутність таких можливостей в Hadoop, а в деяких випадках – можливість підтримувати програми Big Data у режимі реального часу.

Наведемо основні характеристики масово-паралельної аналітичної бази.

**Масово-паралельна обробка (MPP можливості).** Як зазначено в назві, масово-паралельні аналітичні бази даних використовують масово-паралельну обробку або MPP, які одночасно підтримують прийом, обробку та запит даних на декількох машинах. Результатом є значно швидша продуктивність, ніж традиційні сховища даних, що працюють на одній великій коробці і обмежені однією точкою дроселя для зчитування даних.

«Shared-nothing» архітектура забезпечує відсутність єдиної точки відмови в деяких аналітичних середовищах бази даних. У цих випадках кожен вузол працює незалежно від інших, тому, якщо одна машина не працює, інші продовжують працювати. Це особливо важливо в середовищах MPP, в яких іноді сотні машин обробляють дані паралельно. Отже, випадковий збій однієї або більше машин неминучий.

**Стовпчикові архітектури.** Замість того, щоб зберігати та обробляти дані в рядках, як це характерно для більшості реляційних баз даних, в більшості масивних паралельних аналітичних баз даних використовуються стовпчикові архітектури. У стовпчикових середовищах обробляються лише стовпці, які містять необхідні дані для визначення «відповіді» на певний запит, а не цілі рядки даних, що приводить до результатів розділених запитів другого запиту. Це також означає, що дані не потрібно структурувати в акуратні таблиці, як у традиційних реляційних базах даних.

**Розширені можливості стиснення даних.** Вони дозволяють аналітичним базам даних приймати та зберігати більші обсяги даних, ніж це



Ринок продуктів, пов'язаних із Big Data[9]

Програмне забезпечення					
<i>HADOOP</i>	<i>NoSQL</i>	<i>NGDW</i>	<i>Аналітика</i>	<i>Додатки</i>	<i>Інструменти</i>
Hortonworks	DataStax	HP Vert.	Digital Reasoning	Google	Informatica
	Sprrl	EMC Greenpluum	Revolution Analytics	Tresata	talnd
Cloudera	Couchhase	IBM Netezza	Jaspersoft	Opera Solutions	Zettaset
MapR Hadapt	l0gen	SAP	Pentaho	DataXu	Syncrosoft
EMC Greenplum	Basho	Teradata aster	Datameer	SAP	Vmware
Сервіси					
<i>Cloud Service</i>		<i>Технічні сервіси</i>		<i>Професійні сервіси</i>	
Amazon		Hortonworks		Thiink Big Analytics	
Google		Cloudera		IBM	
MapR		Cloudwick		EMC	
IBM		EMC		Accenture	
Microsoft		IBM		Deloitte	

можливо іншим способом, і робити це з значно меншими ресурсами обладнання, ніж традиційні бази даних. Наприклад, база даних з функцією стиснення «10-до-1» може стискати 10 терабайт даних до 1 терабайта. Стиснення даних та пов'язана з ними методика, що називається кодування даних, є критично важливими для ефективного масштабування масивних обсягів даних.

**Апаратне забезпечення продукту.** Як і кластери Hadoop, більшість, але не всі масово-паралельні аналітичні бази даних працюють на нестандартному обладнанні від Dell, IBM та інших, отже, вони можуть економічно розширюватись.

**Обробка даних в пам'яті.** Деякі масово-паралельні аналітичні бази даних використовують RAM для обробки деяких даних в реальному часі. Деякі, такі як SAP HANA і Aerospike, повністю вбудовані в пам'ять, тоді як інші використовують гібридний підхід, який поєднує менш дорогі, але менш ефективні на дисках накопичувачі для «холодніших» (менш використовуваних) даних з RAM для «більш гарячих» (використовуваних) даних.

Тим не менш, масово-паралельні аналітичні бази даних мають кілька слабких місць. Зокрема, вони не призначені для прийому, обробки та аналізу слабо структурованих і неструктурованих даних, які в основному відповідають за зріст популярності та розвиток Big Data.

*Взаємодоповнюваність компонентів, пов'язаних із Big Data*

Hadoop, NoSQL та масово-паралельні аналітичні бази даних не є взаємовиключними. Нині існують принаймні три популярні підходи, які є взаємодоповнюючими та можуть і мають співіснувати в багатьох підрозділах. Hadoop дуже добре підходить для

обробки та аналізу великих об'ємів розподілених, неструктурованих даних в пакетному режимі в рамках історичного аналізу. Бази даних NoSQL допомагають зберігати та обслуговувати багатоструктурні дані в режимі реального часу для веб-додатків, пов'язаних із Big Data. Тоді як масово-паралельні аналітичні бази даних найкраще можуть забезпечити аналіз великих обсягів в основному структурованих даних у режимі майже реального часу.

Історичний аналіз, зроблений за допомогою Hadoop, може бути перенесений в аналітичні бази даних для подальшого аналізу або / та інтегрований зі структурованими даними на традиційних корпоративних сховищах даних. Наприклад, факти, отримані від аналізу Big Data, мають оброблятися у додатках Big Data. Користувач має прагнути до гнучких архітектур Big Data, щоб забезпечити ці три технології / підходи взаємодією та обміном даних.

Існує декілька коннекторів (поєднувачів), які призначені для легкої інтеграції технологічних рішень Big Data розробниками та адміністраторами із Hadoop. Водночас декілька постачальників, наприклад, Pivotal Initiative (раніше – EMC Greenplum, Cetas та ін.) та Teradata Aster пропонують рішення Big Data, що поєднують Hadoop і аналітичні бази даних із попередньо-налаштованим устаткуванням для швидкого розгортання з мінімальним необхідним налаштуванням. Також присутні технології на кшталт Hadapt, що пропонує єдину платформу, яка забезпечує обробку як SQL, так і Hadoop / MapReduce в одному кластері. Фірма Cloudera також переслідує цю стратегію проектами Impala та Hortonworks за допомогою ініціативи із відкритим сирцевим кодом Stinger Initiative.

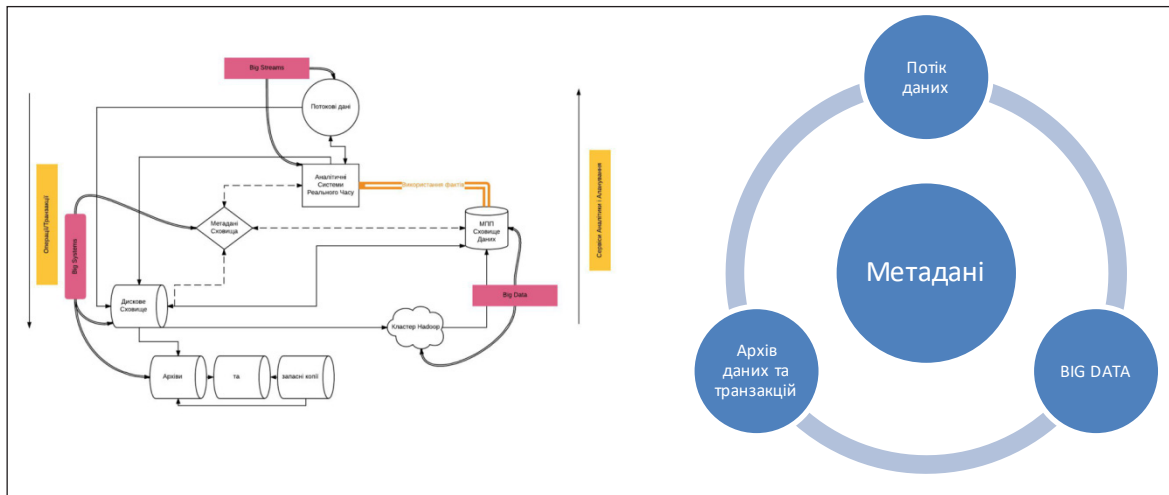


Рис. 4, 5. Процеси взаємодії Big Data [3, 6]

Приємною частиною є те, що підходи Big Data такі, як Hadoop, NoSQL та масово-паралельні аналітичні бази даних мають безкоштовні відкриті проекти, якими можна скористатись, проте у випадку MPP їх ефективність обмежена, що означає, що для реально великих об'ємів потрібне платне рішення. Проте у разі навчальних установ ці рішення часто є умовно-безкоштовними, наприклад IBM надає свій набір рішень DB2 warehouse навчальним установам безкоштовно.

Привабливість продуктів Big Data полягає в тому, що вони дозволяють підприємствам знаходити відповіді на питання, які навіть не поставали (в сенсі залежності між фактами, що породжує можливості для бізнесу і нові підходи у досліджах для науки). Це може призвести до розуміння, що призведе до нових ідей продуктів або допоможе визначити шляхи підвищення операційної ефективності. Тим не менш, існує вже цілий ряд ідентифікованих застосувань як для Big Data, Google, Facebook і LinkedIn, так і для більш традиційного підприємства. Вони включають, зокрема:

- дослідження. Такі підприємства, як науково-дослідницькі інститути та лабораторії використовують Hadoop для обробки великих обсягів даних текстових досліджень та інших історичних даних, щоб сприяти розробці нових продуктів;

- моніторинг мережі. Hadoop та інші технології Big Data використовуються для збору, аналізу та відображення даних, зібраних з серверів, пристроїв зберігання даних та інших пристроїв ІТ-обладнання, щоб дозволити адміністраторам здійснювати моніторинг роботи мережі та діагностувати вузькі місця та інші проблеми. Цей тип аналізу також можна застосувати до тран-

спортних мереж з метою підвищення ефективності використання палива та інших мереж;

- моделювання ризику. Фінансові компанії, банки та інші підприємства використовують сховища даних Hadoop для аналізу великих обсягів транзакційних даних для визначення ризику та ризику фінансових активів, для підготовки до потенційних сценаріїв «що буде, якщо», заснованих на моделюванні ринкової поведінки, та для можливості врахування ризику потенційних клієнтів.

#### Побудова архітектури

Розглянувши у попередньому розділі наявні на ринку продукти, що забезпечують обробку великих даних, постає питання створення архітектурного рішення, яке покликане для зберігання та обробки даних, генератором якого є сам процес навчання. Основною проблемою під час створення таких рішень у рамках вітчизняного процесу навчання є лімітовані ресурси навчальних інституцій, оскільки сам процес обробки великих даних є доволі ресурсо-потребуєчим. З цього факту постає пряма необхідність правильного вибору на користь тих продуктів, що будуть мінімально необхідними для побудови конвеєру обробки, проте будуть виконувати свої функції надійно та відносно швидко, але при цьому будуть мати можливість до вдосконалення та масштабування, що забезпечить максимально ефективне використання лімітованих ресурсів.

Для виконання цієї задачі насамперед треба порахувати можливий потік даних, що будуть зберігатися на носіях даних, для подальшої обробки.

За основу візьмемо процес навчання студентів кафедри ННК ІПСА «СП». У середньому у студентів є 4-5 предметів за один семестр навчання, що можуть бути вигідно покращені шляхом вико-

ристання систем дистанційного навчання для надання матеріалу, інтерактивів та інкорпорації матеріалу, що є продуктом надбання студентами практичних навичок, тобто лабораторних робіт, тестів, творчих завдань та презентацій. До того ж можна припустити, що загальний об'єм даних, що продукує один студент, в рамках одного семестру, за кількості лабораторних робіт, що в середньому становить 5-6 лабораторних робіт за семестр (за особистими спостереженнями авторів), та декількох творчих завдань, буде приблизно становити 60-100 Мб за семестр, не враховуючи об'єму даних, що генерується студентом під час сеансів роботи із системою. Водночас на одному потоці курсу ~70 студентів, отже, можна сміливо припустити, що навантаження на дискове сховище буде становити приблизно  $100\text{Мб} \cdot 70 + x \cdot 70$ , де  $X$  є об'ємом даних з одного потоку за семестр, що продукується самою системою. Попри це, статистичними даними є 500 Мб за один курс на одного студента [5]. При цьому необхідно буде враховувати «найгірший» випадок, коли даних багато, особливо при обмежених ресурсах. Тоді можливе навантаження на сховище буде  $170\text{Gb} = \frac{70 \cdot 500 \cdot 5}{1024}$  за 1 семестр. Також дуже важливий характер даних. Оскільки переважна більшість лабораторних робіт являє собою комбінацію із масивів форматowanego тексту та зображень, можна сказати, що дані мають приблизно однаковий характер. Попри те, треба врахувати додаткові фактори у вигляді даних із форумів, логів системи [2, 7], графів успішності студентів. Отже, можна говорити про слабо структурований характер даних, що становитимуть собою комбінацію із binary file, csv, метаданих [7] та текстових масивів. Проте метадані надаються LMS у вигляді опису «власника» даних, яким є користувач, що репрезентує студента, що суттєво полегшує роботу алгоритму, оскільки не треба встановлювати власника даних під час проведення аналізу.

Також треба врахувати, що важливим моментом у процесі навчання є контроль якості, найпростішим, але найважливішим аспектом якого є контроль плагіату. Реалізувати його можна, використовуючи third-party сервіси, що надають API для користування, проте цей компонент дозволить впливати на розмір навантаження на систему шляхом заборони завантаження файлу на сховище системи залежно від припустимого порогового значення.

Враховуючи огляд існуючих продуктів, що вказаний вище, пропонується побудувати datalake (масив даних та механізму обробки) для обробки даних на базі:

1. MariaDb, реляційна СУБД, що покликана обслуговувати обрану LMS та сховища історичних даних;

2. Apache spark, Hadoop як один із найпростіших та найпопулярніших продуктів;

3. MongoDB NoSQL для забезпечення обміну статистикою між LMS та статистикою додатку оцінювання студента;

Вказані компоненти дозволять швидко та ефективно побудувати даталейк для обробки даних, а також із легкістю контейнеризувати, що забезпечить використання сучасної архітектури, що дозволяє легке оновлення компонентів та масштабування on demand.

**Висновки.** В роботі розглянуто технології та інструментальні засоби, які пропонуються для вдосконалення систем дистанційного навчання і дозволяють трансформувати традиційні технології навчання у змішані (mixed). Створення аналітичної підсистеми в складі LMS, в якій використовуються розглянуті технології обробки великих даних, дозволить підвищити ефективність використання дистанційного складника змішаного навчання і, як результат, якість отриманих знань. Для побудови LMS пропонуються програмні засоби, що є умовно безкоштовними, а також не потребують великих потужностей для інсталяції і обслуговування.

#### Список літератури:

1. Сучасний стан і світові тенденції розвитку дистанційної освіти, П.М. Таланчук, Г.Д. Киселев та ін., Київ 2010, Розділ 5. 470 стр.
2. "Evaluating Predictive Models of Student Success: Closing the Methodological Gap, arXiv: 1801.08494v2, 2018, 29 стр.
3. URL: <http://www.dataversity.net/disrupting-metadata-management-metadata-automation/> (дата звернення 26.07.2018)
4. URL: <https://www.nature.com/articles/s41539-017-0006-5> (дата звернення 26.07.2018)
5. URL: <https://community.canvaslms.com/docs/DOC-10803-421473693> (дата звернення 26.07.2018)
6. URL: <https://files.eric.ed.gov/fulltext/ED562284.pdf> (дата звернення 26.07.2018)
7. URL: <http://jasonpriem.org/self-archived/data-for-free.pdf> (дата звернення 26.07.2018)
8. URL: [https://www.researchandmarkets.com/research/v9bd9l/global\\_corporate?w=5](https://www.researchandmarkets.com/research/v9bd9l/global_corporate?w=5) (дата звернення 26.07.2018)
9. URL: [https://www.researchandmarkets.com/research/dkxjz/global\\_big\\_data?w=4](https://www.researchandmarkets.com/research/dkxjz/global_big_data?w=4) (дата звернення 26.07.2018)

### **ИНФРАСТРУКТУРА ПЛАТФОРМЫ ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДДЕРЖКИ УЧЕБНОГО ПРОЦЕССА**

*Дистанционное обучение, как и любая другая технология образования или повышения квалификации, содержит три составляющие: организация процесса обучения, учебный контент, мониторинг качества образования. Таким образом, система дистанционного обучения или Learning Management System (LMS) – это совокупность приложений, которые автоматизируют все эти составляющие дистанционного образования. В статье рассмотрены важность применения LMS рядом с традиционным процессом обучения. Рассмотрены стандартизации LMS, возможность и необходимость имплементации технологии Big Data, а также технологический процесс дистанционного обучения. Рассмотрен стек технологий, необходимый для выстраивания средств обработки данных в системе, а также их возможности к оказанию результирующих данных для мониторинга знаний студентов дистанционного образования. Рассмотрены сильные и слабые места технологий обработки и хранения данных. Указано на необходимость применения в LMS методов анализа больших массивов слабо структурированных данных и построения архитектуры полного анализа данных. Приведены примеры применения технологии Big Data в целом и примеры продуктов семейства Big Data, которые могут быть применены для построения аналитической составляющей в LMS.*

**Ключевые слова:** LMS, Big Data, Hadoop, NoSQL, Data Lake, Map Reduce, Framework, смешанное обучение, традиционные данные, учебный процесс.

### **THE INFRASTRUCTURE OF THE E-LEARNING PLATFORM FOR THE LEARNING PROCESS**

*The article shows the importance of using LMS in the traditional learning process. The standardization of LMS as well as the possibility of implementing Big Data technology to LMS is exemplified, as well as the scheme of learning process for LMS. The interaction of the components of the system and the processing of the data it produces is demonstrated. The technologies stack that is necessary for the construction of the data processing system, as well as its capabilities, to provide the resulting data for the evaluation system, is demonstrated. The article describes strengths and weaknesses of processing and data storage technology. The need to use LMS to improve the learning process and the ease of use for analyzing large arrays of poorly structured data, as well as the need to build a complete data analysis architecture, also highlights the work of Big Data, as well as examples of the use of technology as a whole and examples of products representing the Big Data family that can be used to build the analytical platform for the LMS data analysis system is demonstrated, as well as the products that are worthy to start construction of own analytical platform for LMS data analysis and evaluation. The author exemplifies other usages of Big Data technology, that proved worthy in another spheres of IT.*

**Key words:** Learning Management System, Big Data, Hadoop, NoSql, Data Lake, Map Reduce, Framework, Mixed Learning, traditional data, studying process.

УДК 004.056.53

**Комаров М.Ю.**

Інститут проблем моделювання в енергетиці імені Г.Є. Пухова НАН України

**Гончар С.Ф.**

Інститут проблем моделювання в енергетиці імені Г.Є. Пухова НАН України

## АНАЛІЗ І ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАГРОЗ ДЛЯ ЗАХИЩЕНОГО ВУЗЛА ІНТЕРНЕТ ДОСТУПУ

*У роботі здійснено аналіз і дослідження основних загроз безпеці інформації для захищеного вузла Інтернет доступу. Приведені загрози для інформації, яка циркулює в захищеному вузлі Інтернет доступу. Показано, що навіть загрози, які на перший погляд не є суттєвими, насправді можуть завдати значної шкоди захищеному вузлу Інтернет доступу. Розробка адекватної та максимально всеохоплюючої моделі загроз під час побудови ЗВІД є обов'язковим етапом захисту інформації. Розглянуто модель основних загроз безпеці інформації, яка циркулює в захищеному вузлі Інтернет доступу.*

**Ключові слова:** загроза, модель, безпека інформації, програмне забезпечення, захищений вузол Інтернет доступу.

**Постановка проблеми.** Захищені вузли Інтернет доступу (далі – ЗВІД) призначені для надання органам державної влади та органам місцевого самоврядування, державним підприємствам, установам, організаціям, іншим юридичним і фізичним особам (далі – споживачам) послуг зв'язку, послуг захищеного доступу споживача до ресурсів і сервісів мережі Інтернет.

ЗВІД будується на базі інформаційно-телекомунікаційної системи (далі – ІТС). ІТС ЗВІД є складною гетерогенною мережею, яка здійснює обмін інформацією та її обробку з метою забезпечення функціональної діяльності захищеного вузла Інтернет доступу й обміну інформацією з іншими організаціями та установами.

ІТС ЗВІД використовує технології побудови локальних обчислювальних мереж (Ethernet) і глобальних обчислювальних мереж (TCP/IP). Як фізичне середовище передачі інформаційних сигналів (горизонтальна підсистема структурованої кабельної системи) в обчислювальній мережі ІТС ЗВІД використовують симетричний кабель типу «звита пара» та волоконно-оптичні лінії зв'язку.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Згідно з нормативними документами системи технічного захисту інформації (НД ТЗІ 1.1-002-99, НД ТЗІ 2.5-004-99) [1; 2], загрози поділяються за результатом впливу на інформацію та систему її обробки; за джерелом впливу загрози; за характером впливу на ЗВІД; за способом впливу на об'єкт атаки; за використовуваним для атаки компонентом ЗВІД; за засобами атаки; за станом об'єкта

атаки. Разом із тим відсутня узагальнена модель загроз для інформації, яка циркулює у ЗВІД.

**Постановка завдання.** Необхідно розробити модель загроз для інформації, яка циркулює у ЗВІД. Під розробкою моделі загроз будемо розуміти класифікацію загроз, їх перелік, наслідки, об'єкти та суб'єкти загроз.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Згідно з нормативними документами, системи технічного захисту інформації за результатом впливу на інформацію та систему її обробки загрози поділяються на чотири класи:

1. Порушення конфіденційності («К») інформації (отримання доступу до інформації з обмеженим доступом).

2. Порушення цілісності («Ц») інформації (повне або часткове знищення, викривлення, модифікація, нав'язування хибної інформації).

3. Порушення доступності («Д») інформації (часткова або повна втрата працездатності системи, блокування доступу до інформації).

4. Утрата спостереженості («С») або керуваності системи обробки (порушення процедур ідентифікації та автентифікації користувачів і процесів, надання їм повноважень, здійснення контролю за їх діяльністю, відмова від отримання або пересилання повідомлень).

За джерелом впливу загрози поділяються на:

– загрози, зумовлені діями людини (викрадення, підміна, пошкодження інформації, паролів та атрибутів доступу, технічних і програмних засобів її обробки);

– загрози, зумовлені технічними засобами (неякісні технічні та програмні засоби обробки інформації);

– загрози, зумовлені стихійними факторами (пожежа, землетрус, повінь тощо).

За характером впливу на ЗВІД загрози поділяються на:

– активні;

– пасивні.

За способом впливу на об'єкт атаки загрози поділяються на:

– загрози з безпосереднім впливом на об'єкт атаки;

– загрози з впливом на систему прав доступу;

– загрози з опосередкованим впливом.

За використовуваним для атаки компонентом ЗВІД загрози поділяються на:

– загрози, які використовують технічні засоби ЗВІД;

– загрози, які використовують технологічну інформацію ЗВІД;

– загрози, які використовують програмні засоби ЗВІД.

За засобами атаки загрози поділяються на:

– загрози з використанням стандартного програмного забезпечення або технічних засобів;

– загрози з використанням спеціально розробленого програмного забезпечення або технічних засобів.

За станом об'єкта атаки загрози поділяються на:

– загрози на об'єкт атаки, який знаходиться в стані зберігання;

– загрози на об'єкт атаки, який знаходиться в стані обробки.

Розглянемо загрози загального характеру, що можуть виникнути в ЗВІД, і можливі наслідки їх реалізації:

– пожежа – виникнення полум'я та розповсюдження пожежі в приміщеннях, де знаходяться технічні засоби ЗВІД. Можуть бути пошкоджені об'єкти захисту, структурні компоненти ЗВІД, канали передачі даних, утрачена інформація;

– руйнування – руйнування приміщень і їх умісту внаслідок вибуху, зсуву, урагану тощо. Можуть бути пошкоджені об'єкти захисту, структурні компоненти ЗВІД, канали передачі даних, утрачена інформація;

– затоплення – заливання приміщень унаслідок аварій, стихійних лих у вигляді дощів, танення снігу, гасіння полум'я водою. Можуть бути пошкоджені об'єкти захисту, структурні компоненти ЗВІД;

– забруднення – запиленість і забрудненість приміщень і технічних засобів. Наслідком можуть стати відмови та збої компонентів ЗВІД та окремих технічних засобів, пошкодження носіїв інформації;

– перегрів – зміна температури повітря внаслідок погодних аномалій, порушення в роботі систем опалення й вентиляції. Наслідком можуть стати відмови та збої компонентів ЗВІД та окремих технічних засобів;

– вологість – зміна вологості повітря внаслідок погодних аномалій, порушення систем вентиляції. Можуть бути пошкоджені носії інформації, електроконтакти, що спричинятиме відмови та збої компонентів ЗВІД та окремих технічних засобів;

– електромагнітні випромінювання – магнітні наводки від потужних електроприладів (трансформатори, електродвигуни, динаміки), електромагнітні бурі. Можливе пошкодження носіїв інформації, відмови технічних засобів;

– поламки, відмови апаратури – відмова в роботі технічних засобів ЗВІД, вихід з ладу апаратного забезпечення внаслідок техногенних аварій, порушення умов експлуатації, несвоєчасного діагностування проблеми. Наслідком може стати непрацездатність компонентів ЗВІД та окремих технічних засобів, утрата й перекручення інформації в процесі запису/зчитування;

– нестача ресурсів – нестача ресурсів центрального процесору, оперативної пам'яті, місця на жорстких дисках, перепускної здатності каналів передачі даних. Може призводити до втрати й перекручення інформації, доступності ресурсів ЗВІД, непрацездатності компонентів ЗВІД та окремих технічних засобів;

– навмисне пошкодження або крадіжка обладнання – навмисний вивід з ладу обладнання, що може призвести до тимчасової або повної непрацездатності компонентів ЗВІД, крадіжка технічних засобів ЗВІД, що може мати як наслідок простій ЗВІД, розголошення технологічної інформації захисту (далі – ТІЗ). Може проявлятися за можливості безпосереднього доступу до обладнання;

– випадкове пошкодження обладнання – ненавмисний вивід з ладу обладнання, що може призвести до тимчасової або повної непрацездатності компонентів ЗВІД. Може проявлятися за можливості безпосереднього доступу до обладнання.

Розглянемо мережеві загрози, що можуть виникнути в ЗВІД, і можливі наслідки їх реалізації:

– відсутність фізичного з'єднання – створення з'єднань, що не відповідають проектній докумен-

тації й/або призводять до порушення функціонування мережі;

- помилки та непрацездатність активного мережевого обладнання (далі – АМО) – помилкове функціонування мережі внаслідок помилок програмної або апаратної конфігурації АМО чи помилок програмного забезпечення АМО. Загроза може мати місце під час проектування, експлуатації та модернізації ЗВІД;

- розголошення даних про мережу – розголошення ТІЗ мережі, що є наслідком мережевої розвідки – збирання інформації про мережу за допомогою загальнодоступних і спеціальних застосувань. На рівні мережі збирається інформація про структуру мережі, наявні сегменти мережі, хости. На рівні АМО збирається інформація про мережеві конфігурації та протоколи (зокрема схему IP-адресації);

- перехоплення (сніферинг) пакетів – розголошення технологічної інформації, що є наслідком перехоплення мережевих пакетів (сніферингу). Сніфер пакетів являє собою прикладну програму, яка використовує мережеву карту, що працює в режимі promiscuous mode (у цьому режимі всі пакети, отримані по фізичних каналах, мережевий адаптер відправляє застосуванню для обробки);

- підміна отримувача (спуфінг пакетів) – утрата даних унаслідок спуфінгу. Це відбувається, коли зловмисник, що знаходиться всередині ЗВІД або поза нею, видає себе за іншого користувача;

- відмова в обслуговуванні (DoS) – атака Denial of Services (DoS) робить мережу або окремі сервіси мережі недоступними для звичайного використання за рахунок перевищення припустимих параметрів функціонування мережі, ОС або застосування;

- дзеркалювання трафіку – для дзеркалювання трафіку (атаки типу Man-in-the-Middle) зловмиснику потрібний доступ до пакетів, переданих по мережі;

- непрацездатність мережевих застосувань – атаки на рівні застосувань можуть проводитися декількома способами. Найпоширеніший із них полягає у використанні добре відомих уразливостей серверного ПЗ;

- створення альтернативних несанкціонованих точок доступу до мережі – існує можливість додзвонювання на модеми, які несанкціоновано підключені користувачами до робочих станцій.

Розглянемо загрози для операційних систем, що можуть виникнути у ЗВІД, і можливі наслідки їх реалізації:

- помилка, збій і відмова системного ПЗ – помилки та відмови системного ПЗ, що можуть

виникати внаслідок неправильних налаштувань ОС, помилок розробників ОС, невідповідності системним вимогам тощо (ненавмисна загроза);

- перехоплення ТІЗ – підглядання атрибутів доступу, автоматичний підбір паролів за допомогою спеціалізованих програмних засобів (закладки типу «троянський кінь»), перехоплення логінів і паролів за допомогою перехоплювачів клавіатури (keyloggers);

- пошкодження файлів ОС – порушення цілісності файлів системного ПЗ (в т. ч. системних журналів) унаслідок необережності або навмисних дій;

- збирання «сміття» – відновлення знищеної користувачем або сеансової інформації (так званого «сміття») шляхом аналізу тимчасових каталогів ОС, оперативної пам'яті тощо;

- втручання в роботу ОС з мережі – зовнішнє втручання в роботу з боку інших користувачів ОС, що спричиняє загрози спостереженості (керованості), цілісності, доступності, а також конфіденційності ТІЗ. Зловмисник може використовувати як відомі вразливості ОС, так і штатні засоби комунікацій.

Розглянемо загрози для прикладного програмного забезпечення, що можуть виникнути у ЗВІД, і можливі наслідки їх реалізації:

- помилка, збій і відмова прикладного ПЗ – помилки та відмови прикладного ПЗ, що можуть виникати внаслідок неправильних налаштувань ПЗ, помилок розробників ПЗ, невідповідності системним вимогам тощо (ненавмисна загроза);

- виконання недокументованих функцій – маскування всередині коду модулів прикладного ПЗ програмних закладок, що здатні перехоплювати технологічну інформацію та здійснювати низку несанкціонованих операцій. Зазвичай закладка слугує відправною точкою для реалізації інших загроз;

- розповсюдження вірусів – ураження й/або пошкодження файлів прикладного ПЗ (в т. ч. файлів журналів) комп'ютерними вірусами. Може здійснюватися як навмисно, так і ненавмисно;

- несумісність версій ПЗ – несумісність різних версій/типів ПЗ, що може спричинити збій в роботі прикладних АС, загрози цілісності й доступності інформації;

- перехоплення ТІЗ – підглядання атрибутів доступу, автоматичний підбір паролів за допомогою спеціалізованих програмних засобів (закладки типу «троянський кінь»), перехоплення логінів і паролів за допомогою перехоплювачів клавіатури (keyloggers);

– підміна або дезорганізація – порушення цілісності ПЗ внаслідок підміни елементів програм, динамічних бібліотек, модулів ПЗ, даних аудиту або дезорганізації структури ПЗ. Може викликати непрацездатність ЗВІД або її компонентів, перекручення даних;

– прикладне ПЗ – обхід чи злам механізмів захисту шляхом аналізу програмного коду за допомогою спеціалізованих програмних засобів з подальшим несанкціонованим отриманням доступу до даних і конфігурацій.

**Висновки.** Приведені вище загрози для інформації, яка циркулює в ЗВІД, наявно демонструють, що навіть загрози, які на перший погляд не є суттєвими, насправді можуть завдати значної шкоди ЗВІД зокрема й інформаційно-телекомунікаційній системі загалом. Розробка адекватної та максимально всеохоплюючої моделі загроз під час побудови ЗВІД є обов'язковим етапом, реалізація якого дасть змогу убезпечити його ресурси, в тому числі інформаційні, від деструктивного впливу загроз будь-якого типу.

#### Список літератури:

1. НД ТЗІ 1.1-002-99. Загальні положення щодо захисту інформації в комп'ютерних системах від несанкціонованого доступу.
2. НД ТЗІ 2.5-004-99. Критерії оцінки захищеності інформації в комп'ютерних системах від несанкціонованого доступу.

#### АНАЛИЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ УГРОЗ ДЛЯ ЗАЩИЩЕННОГО УЗЛА ИНТЕРНЕТ ДОСТУПА

*В работе осуществлены анализ и исследование основных угроз безопасности информации для защищенного узла Интернет доступа. Приведены угрозы для информации, которая циркулирует в защищенном узле Интернет доступа. Показано, что даже угрозы, которые на первый взгляд не являются существенными, на самом деле могут нанести значительный ущерб защищенному узлу Интернет доступа. Показано, что разработка адекватной модели угроз при построении защищенного узла Интернет доступа является обязательным этапом защиты информации. Рассмотрена модель основных угроз безопасности информации, которая циркулирует в защищенном узле Интернет доступа.*

**Ключевые слова:** угроза, модель, безопасность информации, программное обеспечение, защищенный узел Интернет доступа.

#### ANALYSIS AND RESEARCHES OF THREATS FOR A PROTECTED INTERNET ACCESS NODE

*Analysis and researches of threats for a protected internet access node is given in the work. Threats to information circulating in the protected internet access node are presented. It is shown that even threats that, at first glance, are not significant, can in fact cause significant damage to the protected internet access node. It is shown that the development of an adequate model of threats in the building of the protected internet access node is a mandatory step for the protection of information. The model of basic information security threats, which circulates in protected internet access node, is considered.*

**Key words:** threat, model, information security, Software, protected internet access node.



УДК 621.313.12.001.57

**Конущбаєва Т.В.**

Одеський національний політехнічний університет

## АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСОМ ЗНЕВОДНЕННЯ ВОЛОГОЇ ПАРИ ДЛЯ ЕНЕРГОБЛОКУ ВВЕР-1000

У наш час атомна енергетика розвивається високими темпами, вона відіграє революційну роль у науково-технічному прогресі. Немає ніякої серйозної альтернативи ядерній енергетиці. Поки ще не введено технічно ефективні й економічно вигідні шляхи використання невичерпних запасів сонячної енергії. Що стосується органічного палива, то його запаси швидко закінчуються і знаходяться на межі повного виснаження. Під час спалювання в топках теплових електростанцій кам'яного вугілля, нафти чи газу споживається багато кисню, викидається в атмосферу значна кількість пилу, сажі й сірчистого газу. Органічне паливо доводиться добувати у важкодоступних районах, що підвищує їх вартість.

Ядерна ж енергетика має велику енергоємність, тобто обсяг необхідного ядерного палива на одиницю потужності в кілька десятків тисяч разів менший, ніж органічного. Частка вироблення електроенергії атомними електростанціями в Україні становить майже 50%.

На всіх енергоблоках України (окрім ЧАЕС типу реактора РБМК-1000) установлені водо-водяні реактори, у яких звичайна хімічно знесолена вода слугує водночас і сповільнювачем нейтронів, і теплоносієм, що відводить тепло, яке виділяється під час розподілу ядер урану в працюючому реакторі.

Система технічного водопостачання забезпечує охолодження конденсаторів турбін, допоміжного устаткування турбогенераторів, теплообмінного устаткування реакторної установки й устаткування інших допоміжних систем, заповнення дисбалансних вод станції і втрат.

**Ключові слова:** сепаратор-пароперегрівник, регулювання, математична модель, перехідний процес, технічні засоби автоматизації.

**Постановка проблеми.** Чотири сепаратори-пароперегрівники СПП-1000 з комплектувальним устаткуванням призначені для забезпечення припустимої вологості в останніх ступенях турбіни й підвищення ККД шляхом осушки та наступного двоступеневого перегріву пари, що надходить після циліндра високого тиску турбіни К-1000-60/3000, який працює на насиченій парі атомних електростанцій з водо-водяними енергетичними реакторами ВВЕР-1000.

Вимоги, пропонувані до СПП: сепарат і конденсат гріючої пари повинні виводитися зі СПП та накопичуватися в проміжних сепаратор- й конденсатозбірниках, щоб уникнути закидання води в турбіну або її розгону; проміжних збірників вологи має підтримуватися рівень, щоб уникнути проскакування пари; для підтримки процесу теплообміну необхідне видалення з апаратів газів, що не конденсуються; необхідний захист від неприпустимого підвищення тиску.

Сепаратор- й конденсатозбірники, що поставляються в комплекті зі СПП-1000, є проміжними ємкостями для відводу сепарату й конденсату зі СПП-1000. Підтримка рівнів у сепаратор- й конденсатозбірниках здійснюється регулюючими клапанами.

Для захисту корпусу апаратів під час експлуатації від підвищення тиску встановлені мембранні запобіжні пристрої.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Дослідження з СПП проводяться досить давно. Сьогорішні експлуатація проходить дуже добре, що підтверджують АЕС.

Дослідження СПП проводились у роботах, зазначених далі.

Так, математична модель СПП розглянута в роботі В.А. Демченко [1, с. 162–175]. У посібнику [2, с. 132–136] і праці М.А. Стириковича [3, с. 179–184] показані основні характеристики СПП.

Опис СПП поданий у роботі А.С. Клюєва [4].

**Постановка завдання. Мета статті** – вивчення автоматизованої системи управління процесом зневоднення вологої пари для енергоблоку ВВЕР-1000.

### Виклад основного матеріалу дослідження.

Волога пара із циліндра високого тиску турбіни надходить через вхідний патрубок Ду-1200 у вхідну кільцеву камеру, з якої розподіляється по вхідних колекторах сепаратора. Пара з вхідного колектора, направляючись униз через сепаратор, проходить між направляючими лопатками й надходить на жалюзі, де відбувається осадження крапель вологи. Осушена пара проходить через дірчастий лист у вихідний короб. Частина вологи випадає також на стінках і направляючих лопатках у вхідному колекторі і стікає на зливальну підлогу й далі в

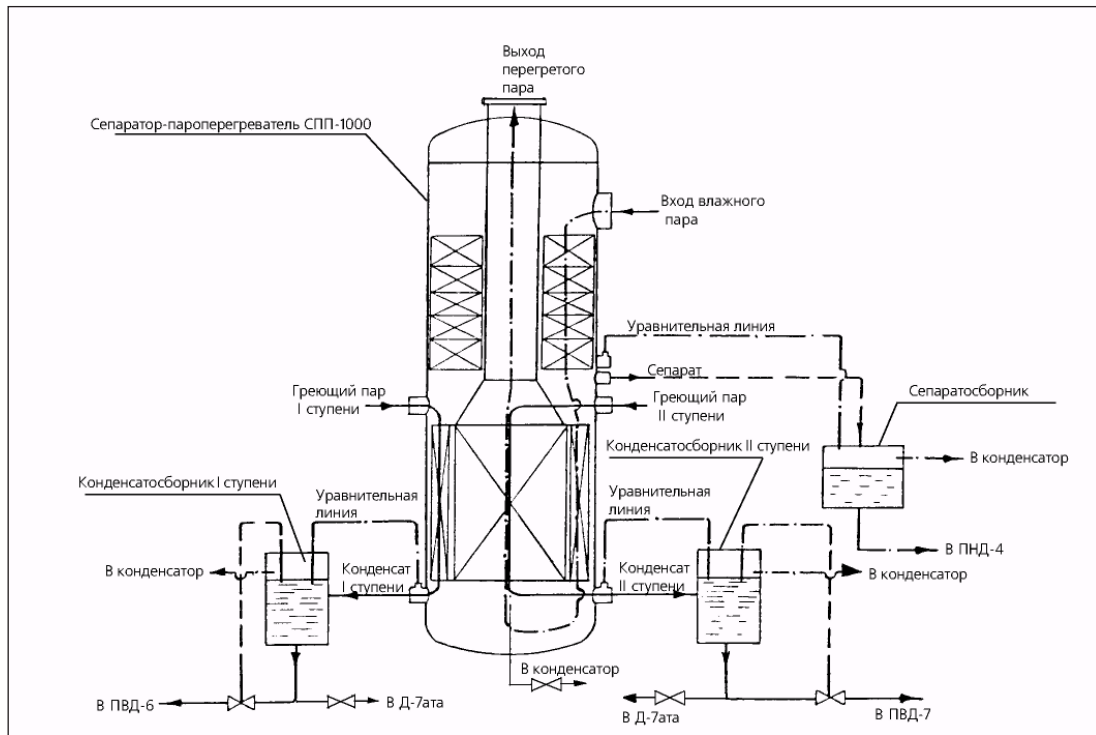


Рис. 1. Теплова схема включення СПП-1000

кільцевий колектор. Інша частина вологи осаджується на жалюзі, з яких стікає в зливальні лотки. Зі зливальних лотків волога потрапляє в зливальну стійку й далі в кільцевий колектор. Із внутрішнього кільцевого колектора відсепарована волога відводиться з нижньої частини сепаратора двома трубами Ду-200 в сепаратозбірник.

Осушений у сепараторі пар надходить у міжтрубний простір 1 ступеня пароперегрівника, де відбувається його остаточна осушка й частковий перегрів. Вийшовши з 1 ступеня, пар розвертається в нижнім еліптичним днищі на 180 градусів і надходить у 2 ступінь пароперегрівника, де відбувається його остаточний перегрів. Із 2 ступеня сухий перегрітий пар через верхню горловину СПП по центральній трубці Ду-1200 приділяється зі СПП-1000 й направляється в циліндр низького тиску турбіни. Гріючою парою для 1 ступеня пароперегрівника слугує пара 1 добору циліндра високого тиску турбіни при тиску  $26,55 \text{ кгс/см}^2$  і температурі  $228,1^\circ\text{C}$ . Гріюча пара підходить до підводячих камер 1 ступеня, розташованих на корпусі апарату. З камер пар, що підводять, по трубах  $32 \times 3$  розподіляється по касетах, де конденсується, віддаючи тепло парі, що перегрівается. Конденсат із касет трубами  $32 \times 3$  збирається у дві камери, що відводять, 1 ступеня, з яких надходить у конденсатозбірник 1 ступеня (КС-1). Камери, що відводять, 1 ступеня й конденсатозбірник КС-1 з'єднані зрівняльною лінією по паровому простору.

Гріючою парою для 2 ступеня пароперегрівника слугує гостра пара тиском  $57,2 \text{ кгс/см}^2$  і температурою  $272,3^\circ\text{C}$ . Гріюча пара підходить до двох камер 2 ступеня, з яких по трубах  $32 \times 3$  розподіляється по касетах. Конденсат із касет трубами  $32 \times 3$  збирається у дві камери, що відводять, 2 ступеня, з яких надходить у конденсатозбірник 2 ступеня (КС-2). Камери, що відводять, 2 ступеня й конденсатозбірник КС-2 з'єднані зрівняльною лінією по паровому простору. Для доступу у внутрішні порожнини СПП-1000, огляду та ремонту його внутрішніх поверхонь є три люки-лази Ду-400.

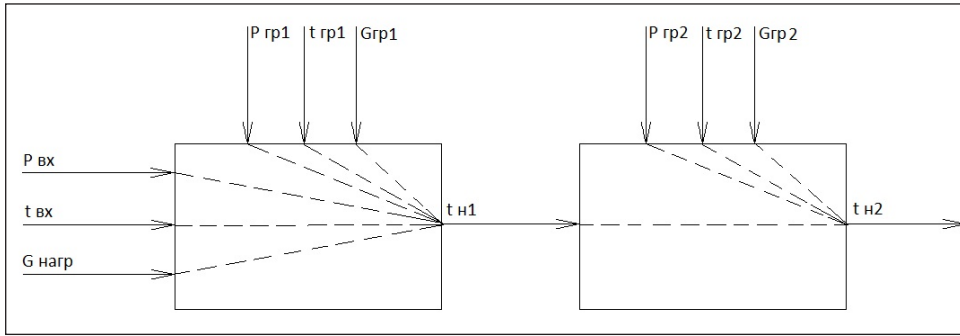
Перед створенням математичної моделі СПП-1000 приймемо такі допущення: пара насичена; втратами қвтр нехтуємо; параметри об'єкта лінійні, зосередженні.

Накопичення енергії в цьому теплообміннику відбувається в трубній системі (стінці, через яку відбувається теплообмін) і парі. Наш сепаратор-пароперегрівник має в складі два теплообмінники, й відповідно для цього потрібно два гріючі теплові потоки.

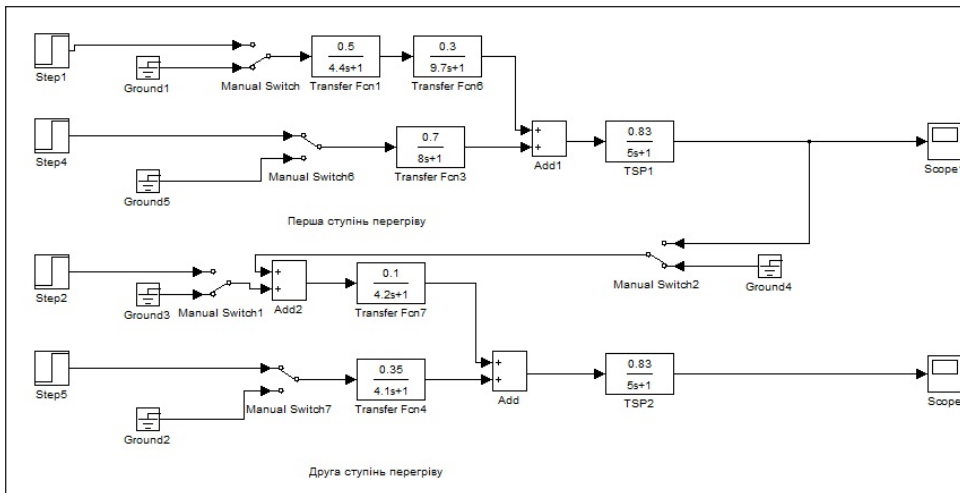
Складемо параметричну схему двоступінчатого перегріву пари в СПП-1000.

Також побудовано структурну схему математичної моделі СПП-1000 з включенням каналів керування, зображену на рис. 3.

Отримані криві розгону по каналах керування впливів, тобто гріюча пара першого ступеня

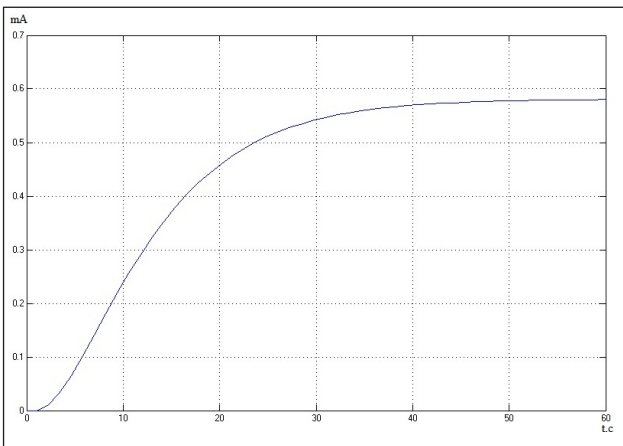


**Рис. 2. Параметрична схема двоступінчатого перегріву пари в СПП-1000**  
де  $P_{вх}$  – тиск вологої пари на вході в СПП-1000;  $t_{вх}$  – температура вологої пари на вході в СПП-1000;  $G_{вх}$  – витрата вологої пари на вході в СПП-1000;  $P_{гр1}$  – тиск гріючої пари першого ступеня перегріву;  $t_{гр1}$  – температура гріючої пари першого ступеня перегріву;  $G_{гр1}$  – витрата гріючої пари першого ступеня перегріву;  $t_{н1}$  – температура пари на виході з першого ступеня перегріву;  $P_{гр2}$  – тиск гріючої пари другого ступеня перегріву;  $t_{гр2}$  – температура гріючої пари другого ступеня перегріву;  $G_{гр2}$  – витрата гріючої пари другого ступеня перегріву;  $t_{н2}$  – температура пари після другого ступеня перегріву (на виході із СПП).

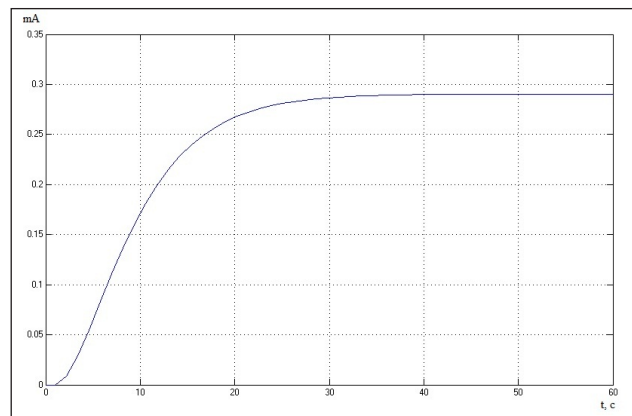


**Рис. 3. Структурна схема математичної моделі СПП-1000 з включенням каналів керування**

перегріву (рис. 4) та гріюча пара другого ступеня перегріву (рис. 5).



**Рис. 4. Крива розгону об'єкта по каналу «навантаження – температура пари, що нагрівається після 1-го ступеня»**



**Рис. 5. Крива розгону об'єкта по каналу «навантаження – температура пари, що нагрівається після 2-ого ступеня»**

Для отримання кривих розгону по каналах збудження включимо схему так.

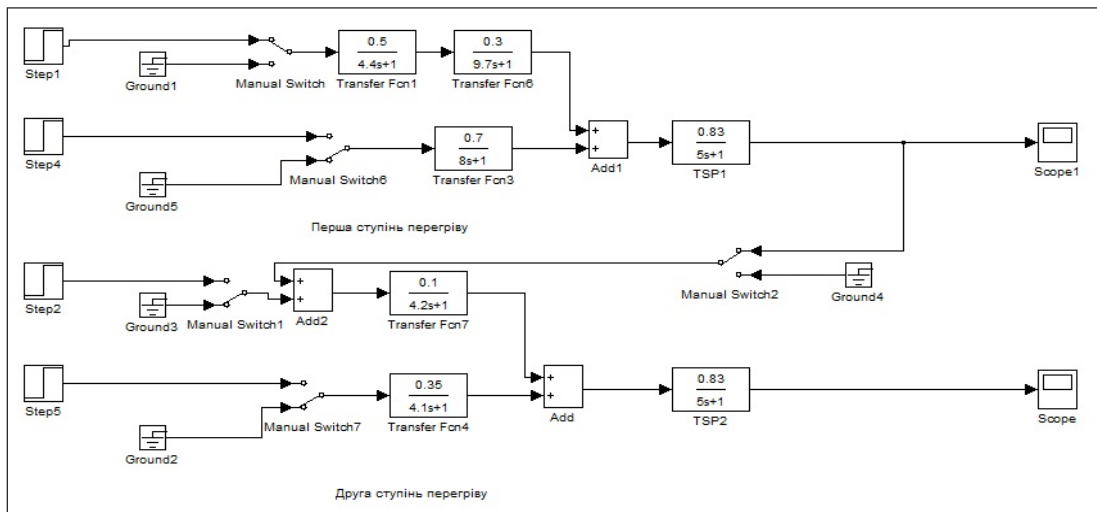


Рис. 6. Структурна схема математичної моделі СПП-1000 з включенням каналів збурення

Отримані такі криві розгону.

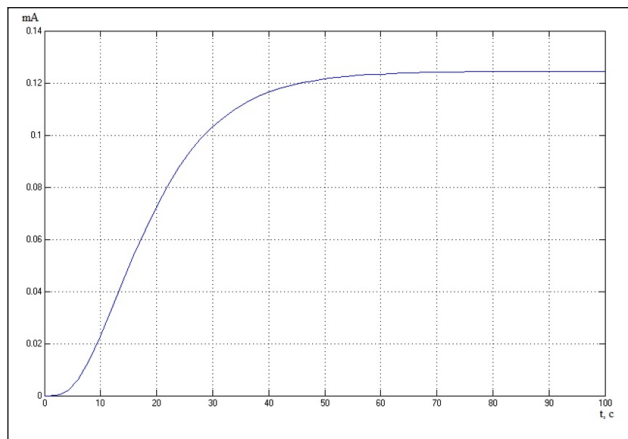


Рис. 7. Крива розгону по каналу збурення на перший ступінь перегріву

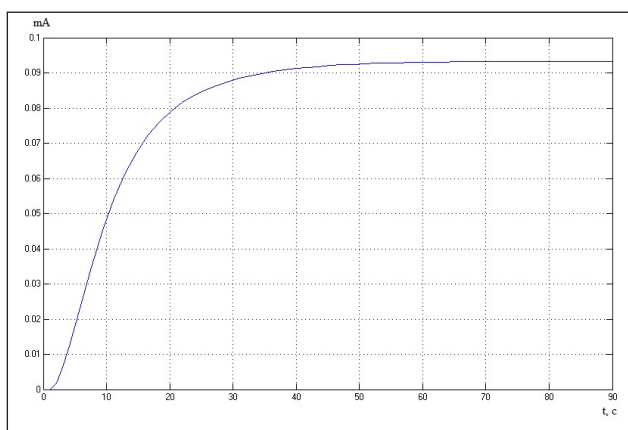


Рис. 8. Крива розгону по каналу збурення на другий ступінь перегріву

Складемо структурну схему регулювання температури пари на виході з перегрівачів першого і другого ступенів (рис. 9).

Оскільки діапазон коливання температури перегрітої пари на виходах з теплообмінників дорівнює  $\pm 5^{\circ}\text{C}$ , поставимо ці межі коливання на схемі.

На виході ми маємо уніфікований сигнал 0...5 мА, діапазон вимірювання ТСПУ дорівнює 0–300 $^{\circ}\text{C}$ . Отже, 1 $^{\circ}\text{C}$  спільномірний із сигналом  $\approx 0,0167$  мА.

Розглянемо перехідний процес регулювання температури пари на виході з першого ступеня перегріву (рис. 10).

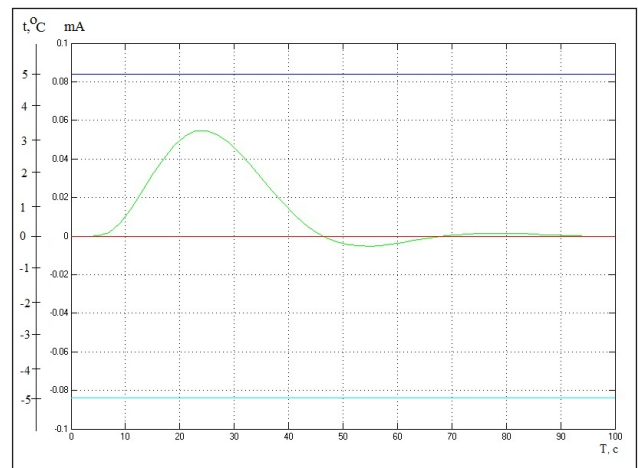


Рис. 10. Перехідний процес регулювання температури пари, що нагрівається після першого ступеня перегріву

Тепер розглянемо перехідний процес регулювання температури пари на виході з другого ступеня перегріву, тобто на виході із СПП (рис. 11).

Отже, з перехідного процесу видно, що температура пари на виході з СПП-1000 регулюється в допустимих межах. У циліндр низького тиску надійде достатньо осушена й перегріта пара з температурою  $250 \pm 5^{\circ}\text{C}$ .

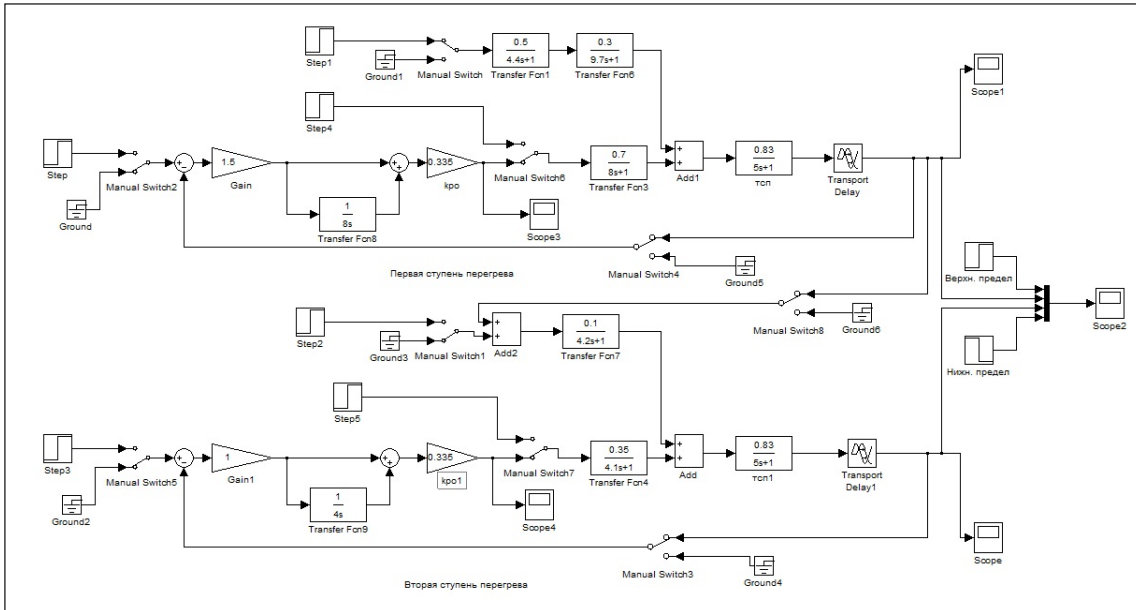


Рис. 9. Структурна схема АСР для моделювання на ЕОМ

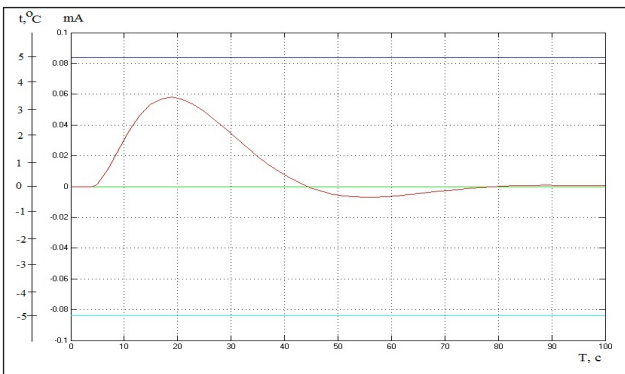


Рис. 11. Перехідний процес регулювання температури пари, що нагрівається після другого ступеня перегріву

Отже, з перехідного процесу видно, що температура пари на виході з СПП-1000 регулюється в допустимих межах. У циліндр низького тиску надійде достатньо осушена й перегріта пара з температурою  $250 \pm 5^\circ\text{C}$ .

**Висновки.** Розроблена математична модель осушення та перегріву пари, досліджені динамічні характеристики, знайдені передатні функції. У програмноупакеті Simulink побудована структурна схема АСР процесу сепарації-пароперегріву. Отримані перехідні процеси регулювання вихідної температури пара після першого перегрівника, а також на виході із СПП.

#### Список літератури:

1. Демченко В.А. Автоматизация и моделирование технологических процессов АЭС и Тес. Одесса, 2001. С. 162–175.
2. ЮУАЕС УТЦ. Пособие обучаемого НСТЦ, ВИУТ, НСЭЦ, система промежуточного перегрева пара. Южноукраинск, 2004. С. 132–136.
3. Стырикович М.А. Теплообмен и гидродинамика в двухфазных потоках атомных электрических станций. Москва, 1982. С. 179–184.
4. Клюев А.С. Настройка средств автоматизации автоматических систем регулирования. Москва, 1981.

#### АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ОБЕЗВОЖИВАНИЯ ВЛАЖНОГО ПАРА ДЛЯ ЭНЕРГОБЛОКА ВВЭР-1000

В настоящее время атомная энергетика развивается высокими темпами, она играет революционную роль в научно-техническом прогрессе. Нет никакой серьезной альтернативы ядерной энергетике. Пока еще не введены технически эффективные и экономически выгодные пути использования неисчерпаемых запасов солнечной энергии. Что касается органического топлива, то его запасы быстро заканчиваются и находятся на грани полного истощения. При сжигании в топках тепловых электростанций каменного угля, нефти или газа потребляется много кислорода, выбрасывается в атмосферу значительное количество пыли, сажи и сернистого газа. Органическое топливо приходится добывать в труднодоступных районах, что повышает их стоимость.

*Ядерная же энергетика имеет большую энергоемкость, то есть объем необходимого ядерного топлива на единицу мощности в несколько десятков тысяч раз меньше, чем органического. Доля выработки электроэнергии атомными электростанциями в Украине составляет почти 50%.*

*На всех энергоблоках Украины (кроме ЧАЭС тип реактора РБМК-1000) установлены водо-водяные реакторы, в которых обычная химически обессоленная вода служит одновременно и замедлителем нейтронов, и теплоносителем, отводит тепло, выделяемое при делении ядер урана в работающем реакторе.*

*Система технического водоснабжения обеспечивает охлаждение конденсаторов турбин, вспомогательного оборудования турбогенераторов, теплообменного оборудования реакторной установки и оборудование других вспомогательных систем, заполнение дисбалластных вод станции и потерь.*

**Ключевые слова:** *сепаратор-пароперегреватель, регулирование, математическая модель, переходный процесс, технические средства автоматизации.*

## **AUTOMATED SYSTEM OF THE MANAGEMENT OF THE PROCESS OF THE REVERSING OF HYDROGEN POWDER FOR VVER-1000 VEGETABLES**

*Nowadays, nuclear energy is developing at a high pace, it plays a revolutionary role in scientific and technological progress. There is no serious alternative to nuclear power. The introduction of technically efficient and cost-effective ways of using inexhaustible solar energy reserves is still not feasible. Regarding organic fuel, its stocks quickly expire and are on the verge of complete exhaustion. When combustion in combustion plants of thermal power plants coal, oil or gas consumes a lot of oxygen, is emitted into the atmosphere a significant amount of dust, soot and sulfur dioxide. Organic fuel has to be extracted from hard-to-reach areas, which increases their cost.*

*Nuclear energy has a high energy intensity, that is, the amount of nuclear fuel needed per unit of power is several tens of thousands times less than organic. The share of electricity generation in nuclear power plants in Ukraine is almost 50%.*

*Water-water reactors are installed at all power units of Ukraine (except for the ChNPP type of the RBMK-1000 reactor), in which the usual chemically desalinated water serves simultaneously and a neutron retarder and a heat carrier that diverts the heat emitted during the distribution of uranium nuclei in a working reactor.*

*The system of technical water supply provides cooling of turbine condensers, auxiliary equipment of turbogenerators, heat exchange equipment of the reactor plant and equipment of other auxiliary systems, filling of imbalanced water stations and losses.*

**Key words:** *steam-superheater separator; regulation, mathematical model, transient technical means of automation.*

УДК 004.9: 005.8

**Кравченко С.М.**

Житомирський державний технологічний університет

**Марчук Г.В.**

Житомирський державний технологічний університет

## ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДОЛОГІЇ DEVOPS В УПРАВЛІННІ ІТ ПРОЕКТАМИ

*У статті досліджується вплив методології DevOps на оптимізацію процесу розробки нових продуктів/сервісів. Виконується порівняння сучасних методологій розробки програмного забезпечення. Здійснюється процес моніторингу при застосуванні методології DevOps.*

**Ключові слова:** проектне середовище, методології проектного управління, ІТ-проекти, розробка програмного забезпечення, моніторинг.

**Постановка проблеми.** Існує багато різних методологій і стандартів проектного управління. Щоб максимально ефективно вибудувати процеси управління, необхідно вибрати оптимальний набір практик управління й розробки програмних систем. Тому необхідно проаналізувати сучасні методології розробки програмного забезпечення, які необхідні для максимальної взаємозалежності розробки, експлуатації та супроводження програмних продуктів і сервісів, з метою їх більш швидкого створення й оновлення.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Протягом останніх десяти років стався значний зсув у підході, який кардинально змінив увесь ІТ-ландшафт. Розробники, втомлені від постійного очікування зворотного зв'язку, почали писати програмне забезпечення, яке автоматизує операційні завдання. Водночас фахівці ІТ-підрозділів почали делегувати свої глибокі знання й багатий досвід у програмне забезпечення, яке написано розробниками.

Сьогодні, коли дуже чіткі межі між розробкою та експлуатацією почали зникати, це призвело до прискорення всього життєвого циклу програмного забезпечення, більш коротких сесій забезпечення якості (Quality Assurance) та багатьох інших змін. З'являються нові процеси, такі як управління безперервною інтеграцією й безперервним розгортанням. Багато великих програмних рішень, які розроблені за допомогою методології DevOps, розгортаються по кілька разів на день, а не кілька разів на рік, як було раніше.

Ця тенденція в автоматизації робочих процесів прогресувала поступово протягом останніх 10 років, поки програмне забезпечення та процеси не досягли своєї зрілості. І вплив, який DevOps уже робить і буде чинити в майбутньому на

інформаційні технології підприємств, необхідно ретельно проаналізувати з погляду всіх залучених учасників цього процесу.

Натепер здійснення моніторингу є однією з найбільш недооцінених галузей під час прийняття методології DevOps. Часта зміна програмного коду змінює підхід до роботи служби моніторингу, роблячи щоденною нормою здійснення таких завдань, як контроль передачі потоків у режимі реального часу, відтворення історії подій, просунута візуалізація тощо. Здійснення постійного та якісного моніторингу стає критично важливим компонентом усіх додатків [5].

Рух DevOps зародився у 2009 році, але його витоки сягають ще глибше. Так, фахівці як приклад інструментарію-прабатька називають популярний кросплатформний клієнт-серверний додаток Puppet, перша версія якого з'явилася ще у 2005 році.

Пізніше на ринку з'явився аналогічний інструментарій, включаючи Chef, Ansible, SaltStack і багато інших. Крім того, навколо цих інструментів утворилися спільноти; розробники й системні адміністратори акумулювали свої знання у вигляді «рецептів», що дають змогу легко і швидко налаштувати програмне забезпечення незалежно від основного дистрибутива Unix.

**Постановка завдання.** За допомогою методології DevOps оптимізувати процес розробки нових продуктів/сервісів, вибрати оптимальний набір практик управління та розробки вимог до інформаційних систем. За допомогою DevOps здійснити процес постійного і якісного моніторингу. Метою роботи є дослідження методології управління проектами для підвищення ефективності її практичного застосування.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Під час дослідження основних методологій розробки програмного забезпечення проаналізовано ітеративний підхід до створення та експлуатації програмних систем і сервісів.

Що призвело до появи DevOps? Потрібно спочатку розглянути розробку програмного забезпечення традиційним способом з використанням каскадної моделі (Waterfall).

Сутність каскадної моделі (рис. 1) – поетапне виконання проекту, причому робота над кожним наступним етапом починається тільки після закінчення попереднього.

Але каскадний підхід не працював: команди провалювали терміни й не вклалися в бюджет. Метод водоспаду не брав до уваги проблеми, що виникають, затримки і збої, мінливі вимоги замовника та навколишнього середовища. Потрібно було шукати альтернативу й міняти процес роботи: регулярно оглядатися назад, аналізувати виконану роботу і тут же усувати перешкоди та вносити зміни. Тому з’явилися гнучкі методології Agile та її похідні.

Методологія Agile передбачає лише процес розробки програмного забезпечення. Agile може реалізуватись різними способами, серед яких – eXtreme Programming, Scrum, Kanban, Lean Software Development тощо.

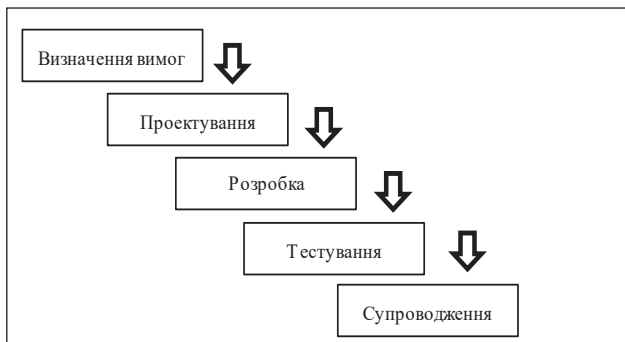


Рис. 1. Процес розробки продукту за методологією Waterfall

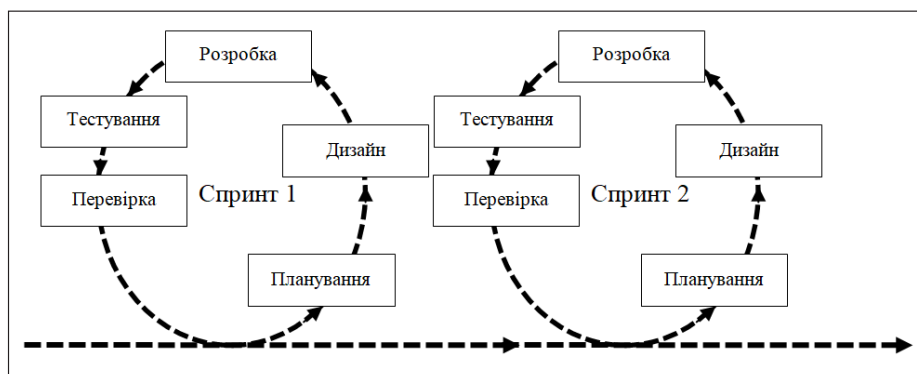


Рис. 2. Процес розробки продукту за гнучкою методологією Agile

Agile – ітеративна модель розробки, в якій програмне забезпечення створюється інкрементно із самого початку проекту, на відміну від каскадних моделей, де код доставляється в кінці робочого циклу (рис. 2).

Основа гнучкої методології – розбиття проєктів на маленькі робочі частинки, які називаються користувацькими історіями. Згідно з пріоритетністю, завдання вирішують у рамках коротких двотижневих циклів (ітерацій).

Особливість Agile в тому, що розробник повністю вільний у своїх діях. Це дає команді низку переваг:

- спрощується комунікація в команді;
- покращується взаєморозуміння між її членами;
- прискорюється загальний процес розробки.

Дейв Томас, один із авторів початкового «Маніфесту гнучкої методології розробки програмного забезпечення», вважає, що цінності гнучкої розробки, закладені в Маніфест, так і не були втілені, а саме позначення Agile перетворилося в маркетинговий термін, позбавлений реального змісту. Так, Маніфест свого часу зламав кайдани на розумі розробників, розвінчавши принципи розробки 80-х і 90-х, але далі процес пішов у непередбаченому напрямі, перетворивши Agile в набір жорстких вимог, яким розробники намагаються сліпо відповідати, незалежно від їх застосування в кожному конкретному випадку.

У подальшому методологія, яка буде активно обговорюватись, стане DevOps, можливості якого багато хто поки не усвідомлює повною мірою. Не можна сказати, що DevOps заперечує Agile: його, скоріше, можна розглядати як розвиток не цілком реалізованих принципів гнучкої розробки. Ключова особливість підходу DevOps – активна взаємодія розробників (Development), тестувальників (QA) і служб експлуатації та підтримки (Operations).

Методологія DevOps у буквальному (акронім DevOps походить від поєднання двох англійських слів – development та operations) та образному сенсах є злиттям двох раніше роз’єднаних процесів: розробки й експлуатації програмного продукту. Протягом багатьох років ці дві групи були роз’єднані між собою



кордонами, зумовленими як специфічними відмінностями, так і наборами оперованих знань, що особливо було помітно у великих ІТ-організаціях корпоративного масштабу.

Розділення було пов'язане з тим, що увага розробників не поширювалась далі за їхній програмний код, а системні адміністратори хоча й працювали з кодом, наданим їм першою групою, але їхнім завданням було взяти цей код і переконаватися в його працездатності для конкретних умов. Повний розрив між цими двома групами зазвичай є основною причиною тривалих циклів забезпечення якості (QA) й мінімальною кількістю виробничих розгортань через побоювання простою або страху просто що-небудь «зіпсувати».

DevOps сфокусована на гранично активній взаємодії й інтеграції в одній команді програмістів, тестувальників та адміністраторів, які синхронізовано обслуговують загальний для них сервіс/продукт. Головна мета цього – створення єдиного циклу взаємозалежності розробки, експлуатації та розгортання програмного забезпечення, щоб у кінці допомагати організаціям (сервісам, стартапам) швидше й безболісніше створювати та оновлювати їхні програмні продукти й сервіси, які експлуатуються в режимі реального часу або «в продакшені».

Орієнтуючись на активну взаємодію та інтеграцію інженерів-програмістів, тестувальників і системних адміністраторів, методологія DevOps базується на ідеї про тісну взаємозалежність розробки та експлуатації програмних продуктів і сервісів, з метою їх швидшого створення й оновлення. Але, щоб такий підхід став успішним, життєво необхідне здійснення всебічного моніторингу в режимі реального часу (рис. 3).

Фахівці нагадують, що для DevOps на першому місці серед пріоритетів стоїть не швидке розгортання, а забезпечення його максимальної надійності без порушень у функціях. До того ж ця методологія, на відміну від Agile, багато

в чому залежна від автоматизації процесів, тому підбираються відповідні інструменти, які будуть уважатися складниками методології DevOps.

Методологія передбачає три головні тези:

1. Оцінюється продуктивність системи загалом, а не відділів або конкретних розробників, адміністраторів, фахівців з якості. Завдання керівника, що впроваджує DevOps, – змусити всіх учасників проекту працювати єдиною командою на досягнення глобальної мети: збільшення цінності продукту для користувачів. Обов'язкова умова – розвивати крос-функціональність, робити співробітників більш універсальними солдатами.

2. Безперервна зворотний зв'язок «справа наліво». Тобто в продукт постійно впроваджуються зміни, відстежується реакція користувачів, готується матеріал для нових завдань, вони йдуть у роботу. Такий «конвеєр» вимагає високого рівня автоматизації процесів тестування й розгортання, створювати його за рахунок нарощування персоналу не правильно.

3. Створення внутрішньокорпоративної культури, що заохочує експерименти. Не можна зрозуміти, як буде оптимально для продукту, без тестування на його кінцевих споживачах. Відповідно, і кожен член команди, і клієнт повинні мислити так: сміливо впроваджувати нове, щоб отримувати найбільш цінний аналітичний матеріал для майбутніх етапів розробки [6].

**Автоматизація DevOps.** Інструментарій DevOps забезпечив високий ступінь стандартизації, пропонуючи ефективні способи розгортання, налаштування й запуску багатьох серверів за допомогою всього лише кількох автоматизованих інструментів, а не покладаючись на втручання операторів. Усе частіше роль команди за технологічними операціями переорієнтується на розгортання й обслуговування автоматизованих додатків-сервісів, що надаються на вимогу, наприклад, через модель PaaS або кластер контейнерів Linux. Розробники розгортають і масштабують індивідуальні програми

в мережі пристроїв, залишаючи команді системних адміністраторів запуск і масштабування цих мереж. Наприклад, щоб отримати безперервну подачу змін на сервер, рекомендують автоматизувати процеси розгортання, складання, тестування, управління версіями тощо [5].

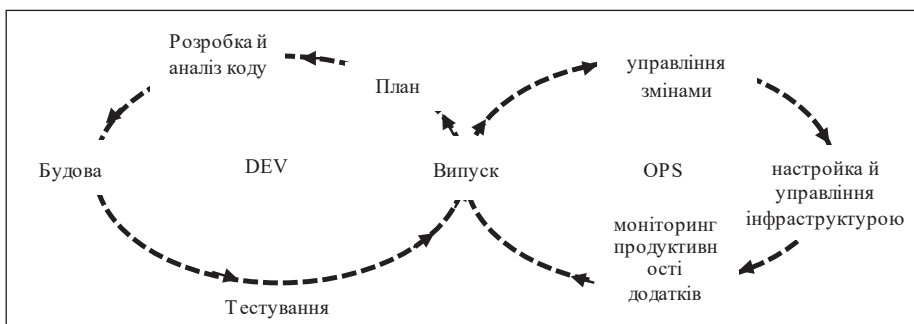


Рис. 3. Процес розробки продукту методологією DevOps

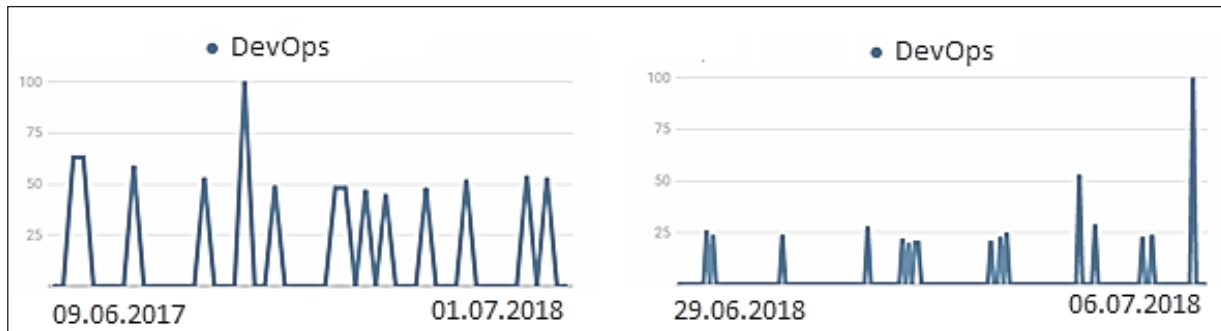


Рис. 4. Динаміка популярності DevOps

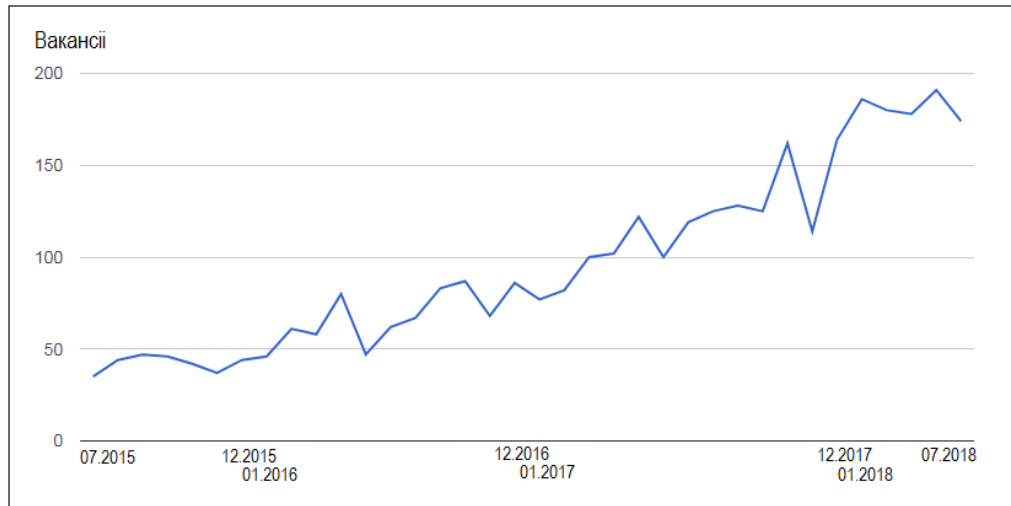


Рис. 5. Тренди jobs.dou.ua: DevOps

Для автоматизованого процесу необхідна підтримка інструментальних засобів (таблиця 1).

Таблиця 1

**Інструментальні засоби для автоматизації процесу**

Тип інструмента	Назва
Автоматизація інфраструктури	Vcfg2, CFEngine, Chef, CloudFormation, Puppet
Автоматизація розгортання	Capistrano, ControlTier, Func, Glu, RunDeck
Інфраструктура як послуга	Amazon Web Services, CloudStack, IBM SmartCloud, OpenStack, Rackspace
Автоматизація збірки	Ant, Maven, Rake, Gradle
Автоматизація тестування	JUnit, Selenium, Cucumber, easyb

**Сучасний моніторинг.** У сучасних DevOps-архітектурах комплексного програмного забезпечення існує безліч даних, які необхідно відстежувати. Більше недостатньо відстежувати тільки найпростіші статистичні дані, такі як RAM, CPU й дисковий I/O. Тепер рішення для моніторингу має

працювати з API та передавати дані безпосередньо із самих додатків. Щоб зрозуміти всю цю інформацію, одним із критеріїв пошуку потрібної сучасної системи моніторингу повинні стати можливості аналізу в реальному часі потокових даних, відтворення історії змін і ще кращі засоби візуалізації.

Наступним найбільш важливим способом оцінити хмарну систему моніторингу є кількість і якість підтримуваних модульних інтеграцій. Роботу зі скількома мовами програмування підтримує система моніторингу? Багато старих систем моніторингу працюють лише з кількома, з особливим фокусом на Java і .Net, незважаючи на те що високорівневі мови програмування стають усе більш важливими для розробки корпоративних додатків. Тому потрібно буде знайти нову систему моніторингу, яку можна буде зав'язати на популярні сценарні мови, такі як Python, Ruby, PHP і Go.

DevOps став причиною ретельного документування всіх операційних знань у відкритих стандартах, що дають змогу записати та відстежити всі процеси й метрики протягом часу. Ці знання можна запрограмувати за допомогою логіки, використовуюваної для побудови сітки програм-

ного забезпечення на платформах, таких як PaaS і кластери контейнерів Linux, і їх можна повторювати та поєднувати з іншими.

**Динаміка популярності.** Сьогодні головним трендом у розробці програмного забезпечення поки ще залишається Agile, але DevOps стає одним із найактивніших трендів починаючи з 2011 року. На рис. 4 представлена динаміка популярності DevOps за останні 12 місяців і 7 днів по Україні за результатами Google Trends.

Згідно з Gartner, у 2016 році 25% із найбільших світових ІТ компаній упроваджували DevOps. Експерти пов'язують таке зростання популярності з масовим упровадженням безперервного розгортання.

На порталі jobs.dou.ua можна побачити динаміку зростання вакансій DevOps Engineer (рис. 5).

**Висновки.** Методологія DevOps продовжить розвиватися. Завжди знайдеться місце для нових інструментів, різних структур і крутих трендів, але основа, яка буде їх разом пов'язувати, полягає у виборі й правильному використанні програмного забезпечення для автоматизації. Інструменти для здійснення моніторингу повинні розвиватися паралельно з технічними тенденціями й у підсумку зуміти задовольнити потреби як розробників, так і системних адміністраторів, надавши необхідну видимість для прийняття нових технологій, таких як Docker, у виробничому середовищі.

### Список літератури:

1. Кеннет С. Рубин. Основы Scrum. Практическое руководство по гибкой разработке ПО. Санкт-Петербург: Вильямс, 2016. 544 с.
2. Стеллман Э., Грин Д. Постигага Agile. Ценности, принципы, методологии. Москва: Манн, Иванов и Фербер, 2018. 448 с.
3. Дэвис Д., Дэниелс К. Философия DevOps. Искусство управления ИТ. Питер, 2017.
4. Хамбл Д., Фарли Д. Непрерывное развертывание ПО. Автоматизация процессов сборки, тестирования и внедрения новых версий программ. Санкт-Петербург: Вильямс, 2016. 432 с.
5. Методология DevOps и её влияние на облачные системы мониторинга. URL: <https://networkguru.ru/metodologiya-devops> (дата звернення: 20.05.2018).
6. DevOps – обзор методологии. URL: <https://blog.sibirix.ru/2014/11/19/devops> (дата звернення: 22.05.2018).

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОЛОГИИ DEVOPS В УПРАВЛЕНИИ ПРОЕКТАМИ

*В статье исследуется влияние методологии DevOps на оптимизацию процесса разработки новых продуктов/сервисов. Выполняется сравнение современных методологий разработки программного обеспечения. Осуществляется процесс мониторинга при применении методологии DevOps.*

**Ключевые слова:** проектная среда, методология проектного управления, ИТ-проекты, разработка программного обеспечения, мониторинг.

### USE OF DEVOPS METHODOLOGY IN PROJECT MANAGEMENT

*The article explores the impact of DevOps methodology on optimizing the process of developing new products/services. Comparison of modern software development methodologies is carried out. The monitoring process is implemented using the DevOps methodology.*

**Key words:** project environment, project management methodology, IT projects, software development, monitoring.

**Мацуї А.М.**

Центральноукраїнський національний технічний університет

**Кондратець В.О.**

Центральноукраїнський національний технічний університет

## АНАЛІЗ РОБОТИ КУЛЬОВОГО МЛИНА ПЕРШОЇ СТАДІЇ ПОДРІБНЕННЯ РУДИ ЯК ОБ'ЄКТА ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ

*Метою статті є здійснення всебічного аналізу роботи кульового млина в першій стадії подрібнення руди як об'єкта оптимального керування. Встановлена структура заходів, які повинні здійснюватися на якісно вищому рівні. Це організаційні заходи переходу на використання куль і футеровки певного типу і технології виготовлення. До організаційно-технічного заходу відноситься перехід на один технологічний тип руди, що переробляється конкретним кульовим млином. Важливим також є і обґрунтування нових підходів, методів, закономірностей і рівнів технологічних параметрів, а також здійснення заходів більш якісного оцінювання та керування технологічними параметрами. Реалізація запропонованих заходів дозволить суттєво знизити собівартість залізрудного концентрату стосовно частки, яка вноситься на даній технологічній ділянці рудопідготовки.*

**Ключові слова:** рудопідготовка, перша стадія, кульовий млин, заходи, організаційні, обґрунтування, оцінювання, керування.

**Постановка проблеми.** Україна відноситься до країн з розвиненою чорною металургією, сировинною основою якої є магнетитовий концентрат, що отримують при збагаченні бідних залізних руд. Перевитрати електроенергії і матеріалів у вигляді куль і футеровки роблять собівартість вітчизняного концентрату дещо більшою порівняно із зарубіжними аналогами. Це негативно впливає на положення України на міжнародному ринку продукції чорної металургії. Фахівці вказують на ряд причин такого стану. Однією з них є недостатній рівень автоматизації рудопідготовки, особливо в першій стадії подрібнення-класифікації [22, с. 5]. Важливість реалізації даного напряму досліджень вказується в роботі [1, с. 275] та інших працях. Звертається увага і на інші напрями удосконалення рудопідготовки. Сьогодні виконано багато досліджень в цій сфері, однак узагальнення практично не здійснюються. Галузь несе великі збитки і це не відповідає положенням Державних документів, спрямованих на енергозбереження і матеріалозбереження. На реалізацію цих задач зорієнтовані і плани наукової тематики Центральноукраїнського національного технічного університету за темами «Комп'ютеризована система ідентифікації завантаження кульового млина при управлінні подрібненням руди» (державний реєстраційний номер (0109U7939) і «Оптимізація продуктивності кульових млинів по руді і готовому продукту при мінімальних енергетичних і матеріальних витратах» (0115U003942). Врахо-

вуючи, що дана стаття спрямована на розв'язання цих задач, її тема є актуальною.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Автоматизацією процесів подрібнення вихідної руди в перших стадіях збагачувальних фабрик займаються достатньо давно вітчизняні вчені, вчені близького та далекого зарубіжжя [15, 19, 26, 13, 32] та інші, однак в рудопідготовці все ще допускаються великі енергетичні та матеріальні втрати. Увага здебільшого приділялася основним технологічним процесам. Розроблялися інформаційні засоби та системи автоматичного керування. Повний їх арсенал розглянуто в роботі [21]. Деякі з цих засобів випускаються серійно. В роботі [11, с. 13] акцентується увага на відсутності надійних засобів контролю необхідної точності або на значній їх вартості. На необхідність розробки інформаційних засобів вказано і в роботі [22, с. 173]. Не дивлячись на те, що рівень автоматизації перших стадій подрібнення руди, обладнання, яке використовується, та технології з року в рік удосконалюються, рудопідготовка на цій ділянці технологічного процесу ще не відповідає сучасним вимогам, хоч ще в 1975 р. О.М. Марюта звернув увагу на те, що процеси на магнітозбагачувальних фабриках необхідно розглядати з точки зору їх оптимізації. Тобто кульовий млин першої стадії подрібнення необхідно розглядати як об'єкт оптимального керування з ув'язкою між собою всіх функціональних систем і параметрів. Такі дослідження ніхто не про-

водив, а саме вони можуть відкрити шлях до розв'язання даної проблеми.

**Постановка завдання.** Метою роботи є здійснення всебічного аналізу роботи кульового млина першої стадії подрібнення руди як об'єкта оптимального керування для отримання структури заходів, реалізація яких дозволить перевести функціонування технологічного агрегату на новий, якісно вищий рівень, що забезпечить отримання максимальної його продуктивності за готовим продуктом за мінімальних енергетичних і матеріальних перевитрат.

**Виклад основного матеріалу.** Бідні залізні руди перед збагаченням в основному подрібнюють у кульових млинах. Перша стадія несе основне енергетичне і матеріальне навантаження. Бідні залізні руди відрізняються значною міцністю, тому кульові млини працюють у водоспадному режимі. В цьому режимі роботи подрібнення матеріалу здійснюється в основному за рахунок ударів падаючих куль [10, с.14]. При цьому майже половина кульового навантаження ефективно не використовується. С.Ф. Шинкоренко експериментально досліджував водоспадний режим подрібнення в барабанному млині. Він встановив наявність двох фаз у цьому процесі – це руйнування ударом і подрібнення тертям. Ним же обґрунтовано положення про можливість збільшення ефективності процесів створення нової поверхні внаслідок збільшення частки руйнування матеріалу тертям [30]. Ще в 1961 р. С.Ю. Андрєєв теоретично довів, що у водоспадному режимі на траєкторіях підйому між шарами кульового навантаження існує ковзання, результатом якого є зменшення кутових швидкостей внутрішніх шарів [2, с. 62]. При цьому частина внутрішніх шарів навантаження циркулює відповідно каскадному режиму, де матеріал в основному розтирається. В таких режимах також може створюватися зона п'яти, де відбувається інтенсивне подрібнення як розтиранням, так і ударом [14, с. 40]. Крім того, у промислових млинах з такими режимами роботи у поперечних перерізах барабана може створюватися малорухоме ядро, навколо якого за замкнутими траєкторіями циркулюють кулі, які до його складу не входять. Тут також здійснюється інтенсивне подрібнення руди розтиранням [14, с. 40]. Такий режим може суттєво покращити показники роботи кульового млина і його слід використовувати.

Для кульових млинів найбільш важливими є співвідношення розмірів куль і подрібнюваного матеріалу, кількість куль, їх густина, твердість, ді-

метр барабана, швидкість обертання [28, с. 139]. Останні п'ять параметрів практично витримуються на оптимальних рівнях. Ефективна робота кульових млинів потребує витримування правильного співвідношення між величиною куль і шматків матеріалу, що завантажуються у технологічний агрегат. Якщо у подрібнюваному матеріалі буде багато великих шматків, які не розмелюються, то вони будуть накопичуватись між подрібнюючим середовищем, що приведе до зупинки технологічного процесу. К.А. Разумов запропонував наступну залежність для визначення діаметра максимальної кулі [22, с. 95]:

$$d_{к.м.} = 28\sqrt[3]{d}, \quad (1)$$

де  $d$  – розмір найбільшого шматка вихідного матеріалу, мм.

Аналіз залежності (1) показує, що при  $d = 27$  мм найбільший діаметр кулі буде  $d_{к.м.} = 84$  мм, при  $d = 20$  мм,  $d_{к.м.} = 76$  мм, при  $d = 15$  мм,  $d_{к.м.} = 69$  мм.

Малі шматки руди краще подрібнюються меншими кулями. Зокрема А.Г. Касаткін вважає за необхідне використовувати можливо більш дрібні кулі, однак не допускаючи зменшення їх діаметра нижче певного значення. Він запропонував мінімальний розмір кулі визначати відповідно формулі [7, с. 786]

$$d_{к\min} = d_{\max} \sqrt[3]{\frac{\sigma^2}{1,28 \cdot E \gamma_k D}}, \quad (2)$$

де  $d_{\max}$  – максимальний розмір шматка подрібнюваного матеріалу в см;  $\sigma$  – межа міцності подрібнюваного матеріалу при стисненні в кг/см<sup>2</sup>;  $E$  – модуль пружності в кг/см<sup>2</sup>;  $\gamma_k$  – густина кулі в кг/см<sup>3</sup>;  $D$  – внутрішній діаметр барабана в см.

Для бідних залізних руд знайдені мінімальні розміри куль за формулою (2). Для  $d_{\max} = 2,5$  см, 2 см і 1,5 см вони відповідно дорівнюють 5 см, 4 см і 3 см.

Розмір подрібнюючих тіл сильно впливає на ефективність і продуктивність кульового млина. Досвід експлуатації кульових млинів показує, що їх продуктивність вище, якщо вони працюють на суміші куль різних діаметрів. Для певної крупності і твердості подрібнюваного матеріалу можливо підібрати характеристику крупності кульової суміші, яка забезпечує найбільш високу продуктивність млина [10, с. 40]. З точки зору максимуму продуктивності існує оптимальна характеристика крупності кульової суміші [22, с. 95]. При цьому бажані кулі можливо меншого розміру, при якому вони ще спроможні добре подрібнювати матеріал даної крупності і твердості [25, с. 207].

Доведено [10, с. 41], що у разі початкового завантаження технологічного агрегату кулями

одного розміру і послідуочого завантаження молольними тілами того ж діаметра, через певний час, коли початкове завантаження спрацюється, в млині створиться суміш куль усіх діаметрів, склад якої визначається законом спрацювання молольних тіл. При цьому склад суміші зберігається впродовж роботи кульового млина як завгодно довго. Тобто в кульовому млині створюється і підтримується усталений склад кульового навантаження, однак він не забезпечує оптимальних показників продуктивності і ефективності внаслідок недовистачання дрібних і середніх куль [10, с. 42].

В роботі [9] на підставі теоретичних розробок і досвіду використання змішаного кульового навантаження запропоновано підхід створення оптимального кульового навантаження перед пуском технологічного агрегату і підтримання його незмінним в процесі експлуатації. Показано, що додаткове завантаження куль необхідно здійснювати різнорозмірними молольними тілами, що співпадає з експериментально встановленим і відміченим фактом в роботі [22, с. 111]. Таке кульове навантаження необхідно підтримувати, однак це потребує розробки обґрунтування підходу його створення.

На продуктивність і ефективність роботи кульових млинів з однотипною футеровкою значний вплив здійснює сегрегація (відділення) подрібнюючих тіл за крупністю вздовж і поперек барабана. Найбільш детально її досліджував Д.К. Крюков [10], та узагальнили автори роботи [6]. Поздовжня сегрегація куль в основному викликана нахилом барабана в напрямі руху пульпи. При цьому крупні кулі скочуються до розвантажувальної цапфи, а більш дрібні легко провалюються між крупнішими молольними тілами і далеко не переміщуються. Як наслідок, більш крупні кулі накопичуються у розвантажувального кінця барабана [10, с. 46]. Розшарування куль у поперечних перерізах барабана пояснюється тим, що центр маси малого сферичного тіла може бути ближче до внутрішньої поверхні барабана порівняно з більшим тілом. Внаслідок цього радіус обертання малих куль більший, а отже, більшою буде і швидкість порівняно з крупними сферичними тілами. Тому мала куля під час обертання барабану при наступних обертах підніметься вище і попаде у зовнішній шар кульового навантаження, більша куля має меншу швидкість, підніметься на меншу висоту і відриваючись від футеровки, залишиться в одному з внутрішніх шарів. Внаслідок цього більш крупні кулі залишаються в середній частині навантаження і не змішу-

ються з малими кулями в усій масі навантаження [6, с. 105]. Явище сегрегації куль за розміром вважають негативним, оскільки більш крупні шматки руди піддані подрібнюючій дії дрібних куль, а дрібний матеріал, навпаки, подрібнюється крупними сферичними тілами. Не дивлячись на це, в такому розподілі куль можливо виокремити і позитивні сторони.

Роль кульових млинів в першій стадії подрібнення виконують технологічні агрегати з центральним розвантаженням і розвантаженням через ґрати. Кульові млини з розвантаженням через ґрати були більш розповсюдженими на збагачувальних фабриках, оскільки відрізняються більш високою продуктивністю і видають подрібнений матеріал з меншим вмістом шламів порівняно з агрегатами з центральним розвантаженням. Питома продуктивність млинів з розвантаженням через ґрати на 10...15% вища ніж продуктивність агрегатів з центральним розвантаженням [24, с. 223]. Недоліком млинів з розвантаженням через ґрати є порівняно складна їх конструкція і тому більш висока вартість на одиницю ваги та на одиницю корисного об'єму. Недоліком млинів з центральним розвантаженням є менша питома продуктивність і більш сильна зашламованість подрібнюваних продуктів [24, с. 223]. Водночас великі кульові млини з центральним розвантаженням зручні в експлуатації, оскільки не потребують тривалих зупинок. Млини з розвантаженням через ґрати вимагають достатньо тривалої зупинки для прочистки ґрат, витрачають більше електричної енергії. Крім того, млини з центральним розвантаженням дають більш прийнятний продукт для перекачування насосами. Витрати на ремонт млинів з центральним розвантаженням менші порівняно з технологічними агрегатами з розвантаженням через ґрати [25, с. 220]. Спираючись на вищезазначене, можна зробити висновок, що в останній час такі кульові млини все більше витісняються технологічними агрегатами з центральним розвантаженням. Особливо великі можливості має кульовий млин з низьким розвантаженням.

Аналіз показує, що від оптимального режиму працюючий кульовий млин може відхилити ряд факторів (рис. 1). Їх можливо подати трьома групами. Першу групу представляють змінні фактори, викликані принципом дії кульового млина або особливостями допоміжного обладнання. До них відносяться наступні: поздовжня і поперечна сегрегація куль, спрацювання куль; спрацювання футеровки; зміна густини пульпи вздовж бара-

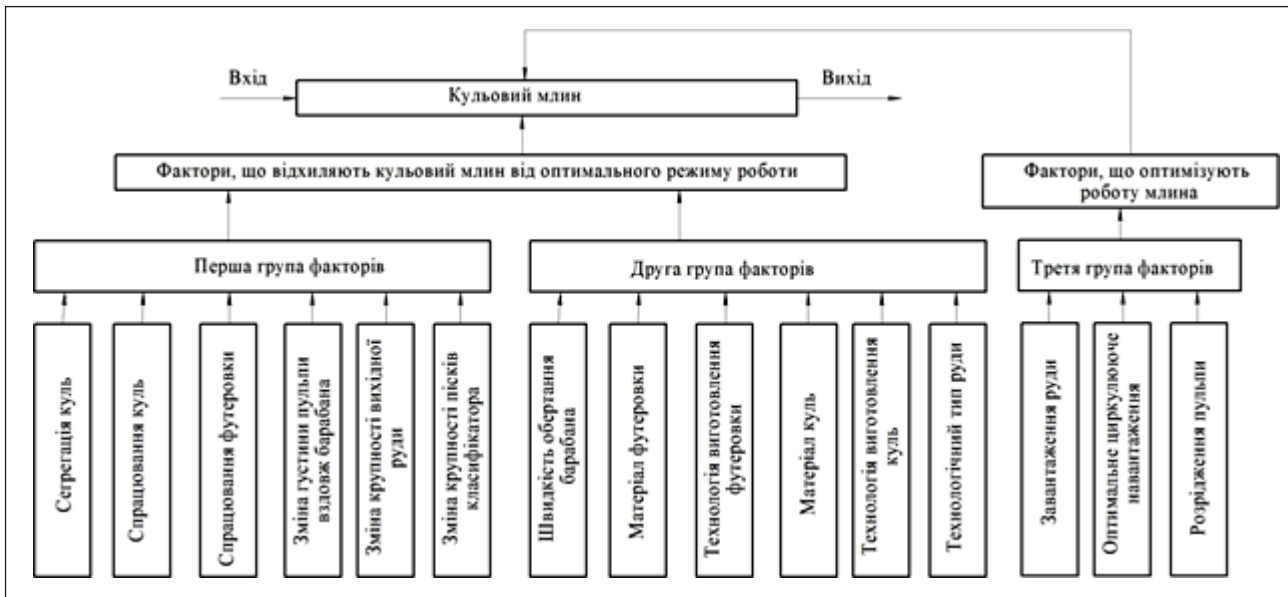


Рис. 1. Фактори, що діють на кульовий млин в процесі роботи

бана; зміна крупності вихідної руди; значення середньозваженої крупності пісків класифікатора. Наступну групу складають фактори, які можуть бути незмінними або змінними. Це – швидкість обертання барабана млина, матеріал і технологія виготовлення куль і футеровки, технологічний тип руди. Третя група включає фактори, завдяки зміні яких можливо досягти оптимального режиму роботи керованого об’єкта. До неї входять завантаження руди в технологічний агрегат і розрідження пульпи на його вході.

Проаналізуємо особливості кожного з вказаних факторів, які впливають на оптимальний режим роботи кульового млина. Спочатку розглянемо фактори першої групи. Під час роботи кульового млина в процесі сегрегації кулі оптимального навантаження розташовуються вздовж барабана, створюючи зони з наближено незмінними розмірами, особливо в шарі, що розміщений біля футеровки [9, с. 193]. Наближено однорозмірні кулі надають можливість оцінювання енергетичної ефективності подрібнення руди безпосередньо в барабані, в зоні, де ще містяться крупні шматки руди. Дрібні кулі біля завантажувальної горловини, де густина пульпи між кусками руди мала, добре пропускають матеріал і крупні шматки, а діють на них не поодинокі, а масивно, блоком, створюючи велике зусилля.

Біля розвантажувального кінця барабана, навпаки, знаходяться крупні кулі. Вони більш ефективно долають перепони у вигляді великої густини пульпи і зафіксованих в ній дрібних частках твердого, які руйнуються ударом, роздавлю-

ванням і розтиранням. Густа пульпа захоплюється крупними кулями на колову, а потім на параболічну орбіту, переміщується разом з ними й ефективно руйнується під час зустрічі з перепонами. За вмісту твердого в пульпі біля 80% може відбутися навіть пакетування куль [22, с. 59], чого не можна допускати. Однак густа пульпа сприяє руйнуванню твердого. В останній час запропоновано молільні тіла спеціальних форм, які підвищують густину навантаження і тим самим продуктивність барабанного млина [29]. Одним з варіантів такого молільного навантаження є використання упаковки однорозмірних куль [4]. В такій упаковці об’єм куль складає 74% проти 26% проміжків, зайнятих рудою. Якщо використовується багаторозмірне кульове навантаження, то в ньому проміжки між кулями складають 38%, що зменшує продуктивність технологічного агрегату. Отже, сегрегація поряд з недоліками несе і певні переваги – це не безпорядне, а закономірне розташування куль в барабані великих млинів, яке можливо врахувати і використати.

В процесі роботи кулі стираються, зменшуючи свій розмір і втрачаючи масу. В моделюванні процесу зносу куль теоретично встановлені закономірності і визначено, яку кількість куль і яких розмірів необхідно додати в млин взамін спрацьованих [9]. Однак на виробництві таке завантаження куль не здійснюється.

Під час подрібнення руди кульовим млином спрацьовується і футеровка, що приводить до збільшення внутрішнього діаметра барабана. Це буде наслідком необхідності зміни швидкості

обертання кульового млина та ступеня заповнення барабана подрібнюючим середовищем. Розрахунки показують, що за умови зменшення товщини футеровки з 150 мм до 50 мм швидкість обертання барабана млина повинна зменшитись на 2,56%, оскільки при цьому відбувається непродуктивна перевитрата електричної енергії. Використання такого керуючого впливу запропоновано в [27], однак тривалий час не реалізується. Сучасні дослідження показують, що дуже часто капітальні витрати на електродвигун зі змінною швидкістю обертання перебільшують потенційну економічну вигоду від його використання [3, с. 3].

Спрацювання футеровки супроводжується збільшенням об'єму барабана і, як наслідок, зменшенням ступеня заповнення подрібнюючим середовищем. Наприклад, в кульовому млині МШР-40x50 за спрацювання футеровки в тих же межах об'єм барабана збільшиться на 11,1%. Якщо первісний об'єм куль в барабані не змінюється, то ступінь його заповнення молотильним середовищем зменшиться з 50 до 45 %. Такі зміни знаходяться в межах допустимих 40...50%, однак при цьому зменшиться продуктивність технологічного агрегату. Це зменшення можливо компенсувати додатковою подачею куль в заміні спрацьованої футеровки. Таким підходом можливо повністю компенсувати вплив зміни діаметра барабана за спрацювання футеровки, однак таких систем керування подрібнюючим середовищем нині не існує.

На вхід кульового млина подається вихідна руда, піски класифікатора та вода з розрахунку певного співвідношення тверде-рідке, однак співвідношення тверде-рідке підтримується, а густина пульпи вздовж барабана змінюється. Оскільки густина пульпи змінюється за своїми закономірностями, а подрібнюоче середовище – за своїми, оптимальність умов подрібнення тут не витримується. Ці питання практично не досліджувалися. Виходячи зі сказаного, для досягнення оптимальних умов подрібнення руди необхідно встановити закономірності зміни густини і в'язкості пульпи вздовж барабана кульового млина.

Зміна крупності суттєво впливає на процес подрібнення руди в кульовому млині першої стадії. Закономірності зміни крупності вихідної руди під час розвантаження накопичувальних бункерів досліджувалися моделюванням даного процесу [8]. Встановлено, що розвантаження бункерів на збагачувальних фабриках відбувається циклічно зі зміною крупності. Звідси видно, що одночасне розвантаження трьох бункерів на конвеєрну

стрічку, що практикується у виробничих умовах [23, с. 8], не вирішує задачі осереднення руди за крупністю. Крупність на вході кульових млинів першої стадії буде змінною величиною, і це необхідно враховувати в процесі оптимізації подрібнення руди.

В кульовому млині подрібненню підлягають лише зерна крупних класів, оскільки заново створений готовий продукт виходить тільки від руйнування таких фракцій. Тому, чим вищий вміст крупних фракцій в руді, що знаходиться в барабані млина, тим буде вищою ефективність подрібнення і продуктивність технологічного агрегату за готовим продуктом. Коливання середньозваженої крупності на вході кульового млина змінює його стан і умови подрібнення. На виході технологічного агрегату буде змінюватись середньозважена крупність матеріалу, а як наслідок, і крупність пісків класифікатора. Отже, оптимізація роботи кульового млина має здійснюватися за умов зміни крупності вихідного живлення і пісків класифікатора.

З факторів другої групи швидкість обертання барабана млина вже розглянута. Її доцільно залишати незмінною. Іншими факторами є матеріал і технологія виготовлення куль і футеровки. Нині на збагачувальних фабриках використовують різні кулі і футеровки. Практично не притримуючись якоїсь стратегії в цьому питанні. Однак аналіз показує, що набагато вигідніше було б використовувати одну певну футеровку, виготовлену за певною технологією, і такі ж кулі. Доцільно обґрунтувати тип куль і футеровки та технологій їх виготовлення, ціни, їх якісні показники і здійснити перехід на конкретну продукцію. Обладнуючи млини однаковою футеровкою і використовуючи певні за якістю, стійкістю і розміром кулі, на підприємстві буде накопичуватись досвід роботи на конкретному матеріалі і типах подрібнюваних руд, що позитивно буде впливати на організацію виробничого процесу.

Формування сировини для перероблення на збагачувальній фабриці є чи не найбільш відповідальною задачею. Сьогодні наразі не існує чітких поглядів на цю проблему. Однією з перших була технологія осереднення руд, однак спроби стабілізації вихідного живлення шляхом впровадження цих технологій широкого використання не знайшли [13, 15]. Підтвердженням цьому є і думка автора роботи [25, с. 217], де сказано: «Для кожного різновиду руди є оптимальні величини валової продуктивності та циркуляційного навантаження, за яких забезпечується найбільш висока продуктивність млина за готовим продуктом».



Отже, таке висловлювання не допускає спільної переробки кількох технологічних різнотипів руд. До такого ж висновку в 2005 р. прийшов і В.В. Морозов, розглядаючи процес з точки зору технології збагачення [20]. У роботі [5] зазначається, що переробка руд в суміші закономірно приводить до пониження показників. В.Б. Кусков і Ю.М. Сишук [12] доводять необхідність індивідуальних підходів для ефективного збагачення складних за речовим і мінеральним складом залізних руд. Щодо формування відповіді на це питання авторами даної публікації також проводилося моделювання підходів подрібнення різнотипів руд на прикладі одного з родовищ [17].

Аналіз технологічних характеристик руд родовища показав, що вони достатньо різноманітні, охоплюючи весь діапазон від легкозбагачуваних до дуже важкозбагачуваних. Технологічно представлені сьома типами. Моделювання підходів подрібнення руд родовища показало, що не дивлячись на співпадіння середніх розмірів вкрапленостей магнетиту і коефіцієнтів подрібнюваності, їх доцільно подрібнювати окремо для отримання найкращих технологічних показників процесу і неперевитрачання електроенергії, куль, футеровки та недопущення втрат корисного компоненту. Доведена доцільність роздільного перероблення окремих типів руд і можливість його здійснення та розпізнавання руд в процесі їх видобування.

Третя група факторів стосується забезпечення оптимального функціонування керованого об'єкта. Розглянемо завантаження кульового млина рудою. Зважаючи на знайдене рішення визначення середньозваженої крупності пісків односпірального класифікатора [18], можливо реалізувати регульовальну характеристику замкнутого циклу подрібнення руди, запропоновану О.М. Марьютою [15, с. 81], у вигляді

$$\frac{Q_B}{Q_P} = \frac{d_P}{d_B}, \quad (3)$$

де  $Q_B$ ,  $Q_P$  – відповідно масові витрати вихідної руди і пісків односпірального класифікатора;  $d_B$ ,  $d_P$  – відповідно середньозважена крупність вихідної руди і пісків класифікатора.

В залежності (3) середньозважені крупності вихідної руди  $d_B$  і пісків  $d_P$  є збурними впливами. Керуючим впливом виступає масова витрата вихідної руди в млин  $Q_B$  при заданих або екстремальних значеннях регульованої величини – продуктивності готового класу в розвантаженні млина. Масову витрату пісків  $Q_P$  односпірального класифікатора можливо віднести як до регулюва-

них, так і до збурних діянь залежно від принципу побудови системи автоматичного керування.

Відомо, що у замкнутому циклі за збільшення продуктивності млина за вихідною рудою циркуляційне навантаження зростає. Циркуляційні навантаження до 400% помітно підвищують продуктивність млина. Збільшення швидкості проходження матеріалу через млин за умови зростання циркуляційного навантаження сприяє підвищенню ефективності роботи подрібнюючих тіл і зумовлює менше переподрібнення матеріалу, що є наслідком збільшення продуктивності технологічного агрегату. Однак, коли показники циркуляційного навантаження стають вищими за його оптимальне значення, продуктивність млина зменшується. Оптимальне циркуляційне навантаження може бути знайденим на основі рівняння кінетики подрібнення. Раціональне циркуляційне навантаження за подрібнення певного виду сировини знаходять для відомої продуктивності. Досягнення оптимального циркуляційного навантаження забезпечується регулюванням продуктивності млина за вихідним живленням при незмінній або незначній зміні вмісту твердого в зливні млина. Методику знаходження оптимального циркуляційного навантаження приводить С.Ф. Шинкоренко [31, с. 190], але вона практично не прийнятна за автоматичного керування процесом. Оптимальне значення циркуляційного навантаження звичайно уточнюють дослідним шляхом. Це значно полегшується, якщо на конкретному кульовому млині подрібнюється певний технологічний різновид руди. Тоді для кожного технологічного різновиду руди можливо знайти оптимальну величину валової продуктивності і циркуляційного навантаження, за яких забезпечується найбільш висока продуктивність за готовим продуктом. Ці дані можливо використати і за умови автоматичного керування подрібненням руди. В автоматичному режимі доцільно також ввести обмеження, суть яких зводиться до наступного. Для ефективної роботи кульових млинів у замкнутому циклі циркуляційне навантаження повинно бути не меншим 150...200% [24, с. 88] – це є нижньою межею обмеження даного параметра. З іншого боку, оптимальне циркуляційне навантаження під час транспортування матеріалу між млином і класифікатором за допомогою завиткового живильника має складати 200...400%. Верхня межа цього діапазону повинна задовольняти умові  $Q/V \leq 12 \text{ т/м}^3 \cdot \text{год}$ , де  $Q$  – продуктивність млина за загальним живленням, т/год;  $V$  – об'єм млина, м<sup>3</sup> [24, с. 102]. Отже, оптимальне

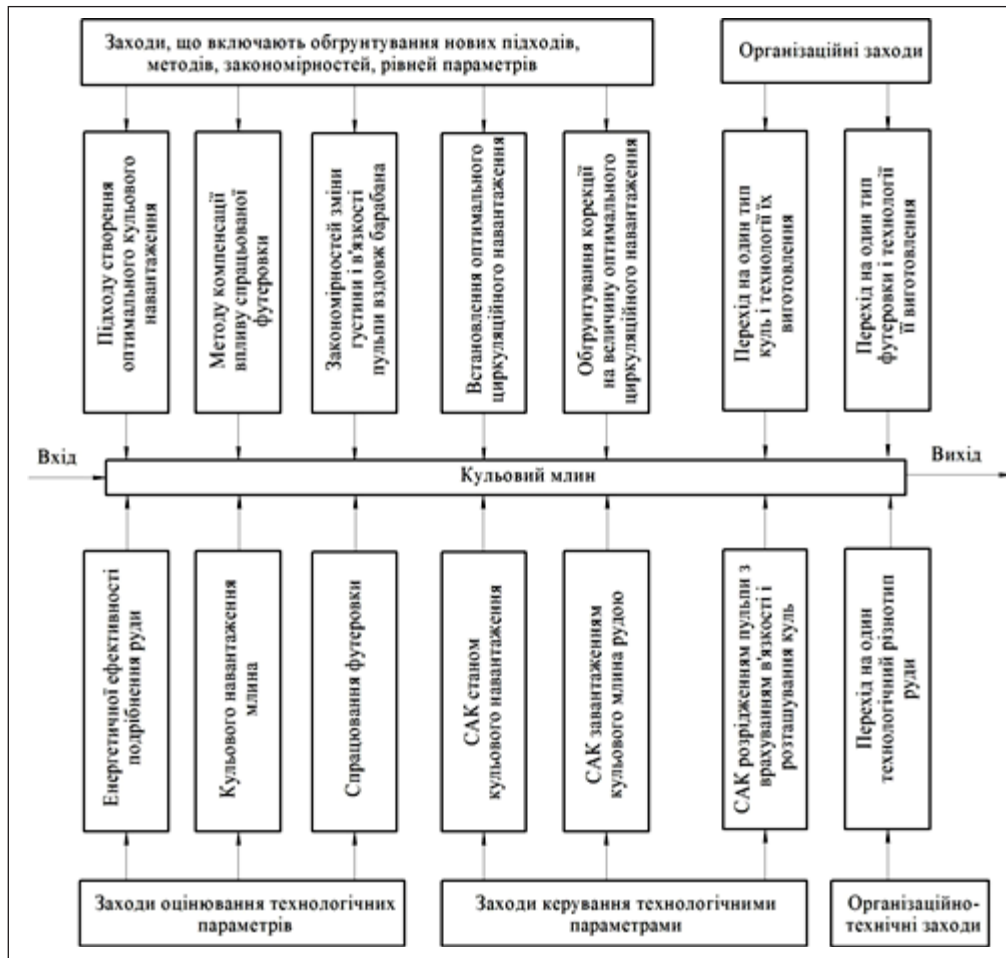


Рис. 2. Заходи, які необхідно реалізувати для переведення функціонування кульового млина першої стадії подрібнення руди на новий, якісно вищий рівень

значення циркуляційного навантаження має знаходитись десь близько біля верхньої межі, яку можливо коректувати залежно від середньозваженої крупності вихідного живлення та показань засобу контролю енергоефективного руйнування руди в кульовому млині. Оптимальне значення циркуляційного навантаження повинно бути тісно пов'язаним з розподілом крупного твердого в пульпі, оскільки подрібненню в млині підлягають тільки зерна крупного класу [3, с. 339]. З іншого боку, враховуючи, що потужність, яка споживається кульовим млином за холостого ходу, незначно відрізняється від її витрати під час роботи з навантаженням, необхідною умовою економічності подрібнення руди є робота технологічного агрегату за умови повного завантаження подрібнюваним матеріалом. Це завантаження ефективно може контролювати засіб енергетичної ефективності подрібнення руди [16].

У кульових млинах першої стадії подрібнення вміст твердого в пульпі звичайно доводять до межі 80...85%, за якої матеріал ще залишається рухо-

мим, що підвищує продуктивність [31, с. 21]. Це можливо пояснити збільшенням кількості зерен, що потрапляють в зону ударних впливів куль при густій пульпі. Задача встановлення необхідного розрідження пульпи в млині ускладнюється ще й тим, що під час подрібнення руди збільшується в'язкість матеріалу, а при вмісті твердого біля 80% може відбуватися пакування куль [22, с. 59] і фактичне припинення подрібнення. Ці завдання вимагають уточнення.

З розглянутого випливає, що основні фундаментальні положення подрібнення руди на збагачувальних фабриках в першій стадії розроблені і успішно використовуються. Для переведення функціонування кульового млина першої стадії подрібнення руди на новий, якісно вищий рівень, що підвищить показники рудопідготовки на цій технологічній ділянці, необхідно реалізувати ряд різнопланових заходів, які приведені на рис. 2.

Їх зміст зрозумілий з назв. Заходи включають обґрунтування певних положень, оцінювання параметрів і автоматичне керування деякими

технологічними параметрами (САК) з новими підходами, організаційні та організаційно-технічні дії.

**Висновки.** Отже, проведений аналіз показав, що в рудопідготовці досягнені достатньо вагомі результати – висока надійність і продуктивність процесів, можливість отримання матеріалу необхідної якості. Однак перед збагачувальною галуззю стоїть задача зменшення собівартості продукції та енергетичних і матеріальних витрат. Для цього функціонування кульового млина першої стадії подрібнення руди необхідно перевести на новий, якісно вищий рівень. Цього можливо досягти за умови здійснення заходів, які розкриті в цій публікації і спрямовані на удосконалення роботи технологічного агрегату. Найбільш

складними в реалізації можуть виявитися заходи, спрямовані на підвищення загальної культури виробництва. До них відносяться переходи на використання конкретних типів куль, виготовлених за певною технологією, футеровки та перероблення на спеціально налаштованих кульових млинах конкретних незмінних технологічних різновидів руди, а також заходи, що включають обґрунтування нових підходів, методів, закономірностей, рівнів параметрів, заходи оцінювання технологічних параметрів та заходи керування технологічними параметрами.

Проведені дослідження відкривають перспективу удосконалення організації виробництва та розробку заходів, включаючи і технічні засоби автоматизації, які раніше не розроблялися.

### Список літератури:

1. Азарян А.А., Кривенко Ю.Ю., Кучер В.Г. Автоматизация первой стадии измельчения, классификации и магнитной сепарации – реальный путь повышения эффективности обогащения железных руд. Вісник Криворізького національного університету. Кривий Ріг, 2014. Вип. 36. С. 276–280.
2. Андреев С.Е. О внутреннем трении в шаровой мельнице. Горный журнал. 1961. № 2. С. 62–68.
3. Андреев С.Е., Перов В.А., Зверевич В.В. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. Москва, 1980. 415 с.
4. Барбанягрэ В.Д., Матвеев А.Ф., Смаль Д.В., Москвичев Д.С. Интенсификация процессов тонкого измельчения материалов в шаровых трубных мельницах. Региональная научно-техническая конференция по итогам конкурса ориентированных фундаментальных исследований по междисциплинарным темам: сборник трудов конференции (Белгород, 09–10 апреля 2015 г.). Белгород, 2015. С. 20–27.
5. Даваасамбуу Д., Эрдэнэцогт Д. Повышение эффективности обогащения медно-молибденовых руд на основе оптимизации процессов дробления и измельчения. Современные процессы комплексной и глубокой переработки труднообогатимого минерального сырья (Плаксинские чтения 2015): материалы Международного совещания (Иркутск, 21–25 сентября 2015 г.). Иркутск, 2015. С. 110–113.
6. Дешко Ю.И., Креймер М.Б., Крыхтин Г.С. Измельчение материалов в цементной промышленности. Москва, 1966. 272 с.
7. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты в химической технологии. Москва, 1961. 820 с.
8. Кондратець В.О., Мацуї А.М. Моделювання розподілу дробленої руди вздовж конвеєрної стрічки при розвантаженні бункерів. Інтегровані технології та енергозбереження. Харків, 2015. № 3. С. 42–50.
9. Кондратець В.О., Рева О.М., Карчевська М.О. Теоретичне дослідження усталених і перехідних режимів роботи куль та футеровки в млинах. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. Кіровоград, 2008. Вип.21. С. 187–196.
10. Крюков Д.К. Футеровки шаровых мельниц. Москва, 1965. 184 с.
11. Купін А.І. Інтелектуальна ідентифікація та керування в умовах процесів збагачувальної технології. Кривий Ріг, 2008. 204 с.
12. Кусков В.Б., Сишук Ю.М. Совершенствование технологий обогащения железных руд различных типов и вещественного состава. Горный журнал. Москва, 2016. № 2. С. 70–74.
13. Линч А. Дж. Циклы дробления и измельчения. Москва, 1981. 342 с.
14. Маляров П.В. Основы интенсификации процессов рудоподготовки. Ростов-на-Дону, 2004. 320 с.
15. Марюта А.Н. Автоматическая оптимизация процесса обогащения руд на магнитообогатительных фабриках. Москва, 1975. 231 с.
16. Мацуї А.М., Кондратець В.О. Контроль енергетичної ефективності руйнування руди кульовим млином. The development of technical sciences: problems and solutions: proceedings of the conference (Brno, 27-28 April 2018 г.). Brno, 2018. С. 115–118.
17. Мацуї А.М., Кондратець В.О. Моделювання підходів подрібнення різновидів руд конкретного родовища у кульових млинах замкнутого циклу. Математичне моделювання. Кам'янське, 2017. № 2. С. 43–49.
18. Мацуї А.М., Кондратець В.О. Теоретичне і експериментальне дослідження магнітоелектричної системи, що сприймає крупність пісків односпірального класифікатора. Електротехніка та електроенергетика. Запоріжжя, 2017. № 2. С. 38–47.

19. Моркун В.С., Цокурєнко А.А., Луценко І.А. Адаптивні системи оптимального управління технологічними процесами. Кривий Ріг, 2005. 261 с.
20. Морозов В.В. Управление процессами обогащения на основе измерения параметров и оценки сортности руд. ГИАБ. Москва, 2005. № 7. С. 316–319.
21. Морозов В.В., Топчаев В.П., Улитенко К.Я. Разработка и применение автоматизированных систем управления процессами обогащения полезных ископаемых. Москва, 2013. 512 с.
22. Пивняк Г.Г., Вайсберг Л.А., Кириченко В.И. Измельчение. Энергетика и технология. Москва, 2007. 296 с.
23. Производство концентрата на обогатительной фабрике ОАО «Полтавский ГОК»: Технологическая инструкция ТИ-3-01-05. Комсомольск-на-Днепре, 2005. 63 с.
24. Разумов К.А. Проектирование обогатительных фабрик. Москва, 1970. 592 с.
25. Серго Е.Е. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. Киев, 1975. 240 с.
26. Троп А.Е., Козин В.З., Прокофьев Е.В. Автоматическое управление технологическими процессами обогатительных фабрик. Москва, 1987. 303 с.
27. Утеуш З.В., Утеуш Э.В. Управление измельчительными агрегатами. Москва, 1973. 280 с.
28. Ходаков Г.С. Физика измельчения. Москва, 1985. 307 с.
29. Шаровая загрузка барабанной мельницы: пат. 2477659 Российская федерация: МПК С2 В02С. №2010121271/13; заявл. 25.05.10; опубл. 20.03.13, Бюл. № 8. 9 с.
30. Шинкоренко С.Ф. Исследования в области теории и технологии измельчения руд: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.15.08. Днепропетровск, 1978. 53 с.
31. Шинкоренко С.Ф. Технология измельчения руд черных металлов. Москва, 1982. 212 с.
32. Herbst J.A., Pate W.T., Oblad A.E. Model-based control of mineral processing operations. Powder Technology, 1992. Vol.69. Pp. 21–32.

#### **АНАЛИЗ РАБОТЫ ШАРОВОЙ МЕЛЬНИЦЫ ПЕРВОЙ СТАДИИ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ РУДЫ КАК ОБЪЕКТА ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ**

*Целью статьи является осуществление всестороннего анализа работы шаровой мельницы в первой стадии измельчения руды как объекта оптимального управления. Установлена структура мероприятий, которые должны осуществляться на качественно высшем уровне. Это организационные мероприятия перехода на использование шаров и футеровки определенного типа и технологии изготовления. К организационно-техническому мероприятию относится переход на один технологический тип руды, который перерабатывается конкретной шаровой мельницей. Важным также является и обоснование новых подходов, методов, закономерностей и уровней технологических параметров, а также осуществление мероприятий более качественного оценивания и управления технологическими параметрами. Реализация предложенных мероприятий позволит существенно снизить себестоимость железорудного концентрата касательно доли, которая вносится на данном технологическом участке рудоподготовки.*

**Ключевые слова:** рудоподготовка, первая стадия, шаровая мельница, мероприятия, организационные, обоснования, оценивания, управление.

#### **ANALYSIS OF OPERATION OF THE BALL MILL OF THE FIRST STAGE OF MILLING ORE AS A OBJECT OF OPTIMUM CONTROL**

*The goal of the article is to make a comprehensive analysis of the operation of a ball mill in the first stage of ore crushing as an object of optimal control. It was created the structure of actions which occur on higher level. These are organizational actions for the transition to the use of balls, lining of a certain type and the manufacturing technology. The organizational-technical action belongs the transition to a single technological type of ore, which is processed by a specific ball mill. It is important to find an argument of new approaches, methods, regularities and levels of technological parameters, as well as the occur of actions for more qualitative assessment and management of technological parameters are also important factors. The implementation of the proposed actions will significantly allow to reduce the cost of expenses of iron ore concentrate with respect to the share that is belonged to this technological area of ore preparation.*

**Key words:** ore preparation, first stage, ball mill, organizational, arguments, assessments, control.

Мещеряков Д.В.  
АО Петрософт

## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ЗАПАЗДЫВАНИЯ НА УСТОЙЧИВОСТЬ СИСТЕМЫ С БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

*Рассмотрено влияние времени запаздывания преобразования информации на устойчивость системы регулирования с биологической обратной связью. Проанализированы реакции организма на скачкообразное инфракрасное воздействие с учетом их информативности и времени формирования. Показано, что мобильные устройства дистанционного преобразования данных вносят значимую временную неопределенность, влияющую на качество управления. Предложены пути снижения и компенсации влияния запаздываний.*

**Ключевые слова:** биологическая обратная связь, время формирования, информативные признаки, управление.

**Постановка проблемы.** Системы с биологической обратной связью являются сравнительно новым типом систем автоматического управления, в которых человек может выступать в роли системы принятия решений, объекта управления, обратной связи. Система инфракрасной пелоидотерапии, предназначенная для лечения опорно-двигательного аппарата человека, относится такому типу систем [1]. В ее состав входят инфракрасные излучатели различного спектрального диапазона и специальным образом сконструированные отражатели, обеспечивающие формирование бестеневого поля облучения пациента внутри камеры.

При проведении пелоидотерапии подбирается такая интенсивность инфракрасного облучения, которая наиболее способствует процессу лечения. В зависимости от характера заболевания, массы пациента, пола и возраста требуется соответствующая интенсивность облучения, поэтому дифференцируются группы с близкими показателями. С точки зрения теории автоматического управления такая система является разомкнутой.

Ситуация существенно меняется, если процедура лечения предназначена для одного пациента. В этом случае появляется потенциальная возможность по ощущению комфорта пациентом формировать присущее только ему инфракрасное поле, которое обеспечивает максимальный терапевтический эффект. Поскольку понятие комфорта является субъективным и качественным, то необходим набор некоторых количественных показателей, которые удовлетворяют принятия решения по автоматическому управлению интенсивностью излучения, обеспечивающему этот комфорт. Человек оказывается в цепи биологической обратной связи системы управления интенсивностью инфракрас-

ного облучения, а система управления становится замкнутой.

Включение человека в цепь обратной связи приводит к двум проблемам. Первая состоит в том, что необходимо выделить базовые признаки реакции человека на инфракрасное воздействие, которые бы представляли эту причинно-следственную связь. Однако в физиологической системе нет невзаимосвязанных реакций и базовых координат, которые используются в технических системах, поэтому любой признак или их набор лишь косвенно характеризует реакцию организма на интенсивность излучения. Вторая связана с влиянием запаздывания на качество управления. Реакции человеческого организма на внешние воздействия имеют достаточно большой разброс, который зависит от множества факторов, в том числе предыстории. Кроме того, запаздывание вносят и технические средства, такие как низкочастотные фильтры подавления помех, инерционность керамических излучателей, системы считывания измерительной информации, контроллеры, сети передачи сообщений.

**Анализ последних достижений и публикаций.** Теория систем автоматического управления достаточно глубоко проработана, в том числе вопросы устойчивости замкнутых систем [2]. Обобщая проблемы создания устойчивых автоматических систем, можно утверждать, что запаздывание является одним из основных негативных факторов [3]. Переход на цифровые системы обработки данных в системах управления усугубила эту проблему, поскольку практически были сняты проблемы сложности алгоритмов обработки, что приводит к удлинению процесса принятия решения [4]. Наличие запаздывания в контурах управления ведет к снижению устойчивости замкнутой системы даже

при небольших коэффициентах усиления регуляторов [5]. Основная трудность при этом заключается в обеспечении устойчивости и качества функционирования.

Пространственное отделение подсистемы цифровой обработки информации от датчиков и исполнительных органов приводит к дополнительной задержке, связанной с передачей информации по каналам связи [6]. Особенностью построения компьютерных сетей является то, что запаздывание приема данных относительно их поступления может достигать значительных величин. Оно зависит от загрузки сети, пропускной способности канала и при неблагоприятных условиях [7] может выходить за допустимые пределы, необходимые для процесса управления.

Вместе с тем развитие систем с биологической обратной связью и исполнительной и сенсорной частями, отделенными от подсистемы преобразования данных, приводит к новым проблемам, поскольку человек (как сложная система) выступает приемником инфракрасного излучения и источником признаков реакции на полученное воздействие [8].

**Постановка задания.** Целью работы является поиск путей снижения времени формирования отклика по реакции человека на интенсивность инфракрасного воздействия.

**Изложение основного материала исследования.** Повысить качество управления объектами с запаздыванием можно двумя способами:

- уменьшением запаздывания в объекте путем выбора показателей с меньшим запаздыванием;
- применением более сложной структуры системы управления, позволяющей уменьшить негативное влияние запаздывания.

Наибольший лечебный эффект при лечении методом инфракрасной пелоидотерапии достигается при ощущении состояния комфорта пациентом [9]. Комфорт представляет собой качественный показатель, который невозможно использовать в качестве формального признака для реализации управляющих действий. Проведенный анализ и экспериментальные исследования показывают, что наиболее значимыми выходными признаками являются сопротивление кожного покрова, частота сердечных сокращений, частота дыхания, артериальное давление, которые частично определяют состояние сердечнососудистой системы, теплоотдачу за счет поверхностного переноса и распределения теплового потока и охлаждения за счет испарения. Состояние камеры пелоидотерапии описывается теневой и радиационной температурой. Все приведенные

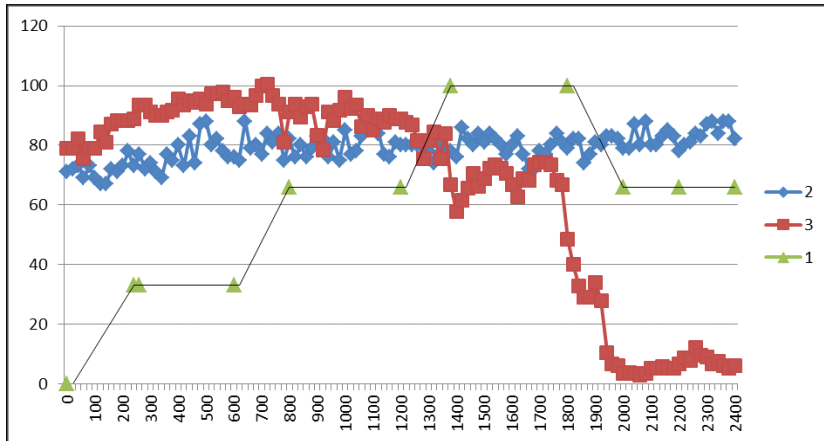
показатели являются измеряемыми, поэтому могут использоваться для подготовки данных управления.

Считывание данных признаков представляет не совсем тривиальную задачу, поскольку мониторинг должен производиться в реальном времени управления на подвижном пациенте. К сенсорным устройствам предъявляются и медицинские и эргономические требования: простота установки, малые габариты, масса, дешевизна. Кроме того, необходимо выбрать технологию сбора и дистанционной передачи измеряемых данных на внешнее обрабатывающее устройство.

Анализ различных технологий считывания первичной информации датчиков и преобразования данных мониторинга показал, что наиболее соответствующей поставленной задаче следует признать ARDUINO [10]. Основными ее достоинствами являются такие: согласованность с операционной системой Windows 10, проводными и беспроводными каналами связи с распространенными устройствами, малые габариты и низкое энергопотребление. Наличие в свободном доступе технологий Windows Remote Arduino и Windows Remote Arduino позволяет управлять цифровыми и аналоговыми портами для работы с датчиками и использовать смартфон в качестве виртуальной платы расширения [11].

Считывание показаний теневой и радиационных температур с помощью полупроводниковых датчиков не представляет сложности, поскольку это типичная задача для Arduino. Измерение кожного сопротивления выполняется по стандартной методике электрическими контактами, между которыми расположен участок кожного покрова. При поверхностном нагреве кожи инфракрасным излучением активизируется периферическая кровеносная система, снижающая сопротивление кожи. Генерация секрета потовых желез при поверхностном нагреве излучением приводит к росту проводимости кожи за счет ионной проводимости секрета, что сводит задачу к измерению электрического сопротивления, типичную для Arduino. В качестве измерителя частоты сердечных сокращений использован стандартный пульсоксиметр CMS50E, надеваемый на палец, который считывает показания частоты с периодом 8–10 секунд.

Аппаратная задача управления интенсивностью инфракрасного излучения решалась лишь по анализу изменения лишь одного фактора – сопротивления кожного покрова человека, который характеризует эффективность отбора тепла периферической частью сердечнососудистой системы и фазового способа охлаждения. Очевидно, что при переходе



**Рис. 1. Экспериментальные характеристики запаздывания реакции на ступенчатое инфракрасное излучение:**  
**1 – интенсивность излучения, 2 – частота сердечных сокращений, 3 – сопротивление кожного покрова**

к комплексу выходных признаков человека будет лишь меняться алгоритм обработки данных, а не принципы управления излучателями. Наиболее приемлемым методом управления интенсивностью излучения признана широтно-импульсная модуляция, которая может быть реализована аппаратно-программными средствами Arduino.

Поскольку пациент в камере пелоидотерапии, в соответствии с методикой лечения, перемещается в камеру пелоидотерапии, то система обработки информации по мониторингу и управлению излучателями должна быть разнесена каналом Bluetooth, что приводит к дополнительному запаздыванию за счет реализации сетевых протоколов обмена с мобильным устройством. Это запаздывание зависит от загруженности сети и в критических случаях может иметь неприемлемое значение относительно устойчивости процесса управления. На результирующее запаздывание оказывает влияние также время между квантами выборки данных, временной сдвиг низкочастотных фильтров подавления шумов, время принятия решения, нагрева или охлаждения инфракрасных нагревателей. На рис.1 приведены экспериментально полученные зависимости времени запаздывания изменения сопротивления кожного покрова и частоты сердечных сокращений от повышения и снижения интенсивности инфракрасного излучения.

Из приведенных зависимостей следует, что сопротивление кожного покрова является весьма информативным показателем, однако время запаздывания крайне велико, особенно при снижении интенсивности излучения, что связано с медленным испарением жидкости с поверхности кожи. Исходя из полученных результатов экспериментов,

становится очевидным, что ни один из приведенных признаков не может полностью характеризовать реакцию организма человека на облучение инфракрасным полем различной интенсивности. Поэтому измеряемые признаки можно разделить по информативной и временной значимости. Так, сопротивление кожного покрова является наиболее информативным, однако время запаздывания слишком велико, особенно при снижении интенсивности облучения. Результаты первичного преобразования существенно зависят от ионной проводимости жидкости поверхности кожи, которую

необходимо снижать, например, путем принудительного охлаждения по информации о начале снижения интенсивности облучения. Эта информация может быть получена от пирометра, который отслеживает поверхностную температуру кожи пациента. Частота сердечных сокращений в непосредственном виде не очень информативна, поскольку она не отражает процессы перераспределения потоков крови внутри организма, однако скорость ее изменения достаточно четко сигнализирует о таких изменениях. Изменение показателей частоты сердечных сокращений, как и частоты дыхания и артериального давления, существенно лишь при больших интенсивностях теплового потока.

Из приведенного анализа следует, что каждый показатель должен иметь свой алгоритм преобразования первичной информации. Некоторые признаки, например, радиационная температура кожного покрова, могут быть использованы как управляющие и применены для уменьшению времени запаздывания такого информативного признака как поверхностное сопротивление кожного покрова. Использование частоты сердечных сокращений предполагает определение первых производных и их последующий анализ.

Результатом разработки явилось устройство на базе технологии Arduino с программным продуктом, которое осуществляет мониторинг теневой и радиационной температуры внутри камеры инфракрасной пелоидотерапии, сопротивления кожного покрова, частоты сердечных сокращений, частоты дыхания.

Для экспериментальной проверки возможности управления интенсивностью излучения только по одному фактору (сопротивлению кожного покрова)

разработана мобильная система дистанционного управления интенсивностью излучения инфракрасными нагревателями на базе стандартного смартфона и аппаратно-программных средств Arduino. Система производит считывание данных о сопротивлении кожного покрова с внешнего устройства мониторинга, осуществляет фильтрацию сигнала с целью шумоподавления, генерирует графическое изображение процесса, принимает решение относительно пошагового изменения интенсивности излучения, формирует сигнал широтно-импульсного управления инфракрасными излучателями. В качестве тестирующего сигнала использован меандр прямоугольных импульсов, обработка кото-

рого позволяет определить степень шумоподавления, запаздывания реакции промежуточных звеньев системы на входные изменения и, как следствие, требования к структуре системы, позволяющей минимизировать их влияние.

**Выводы:**

– обоснована значимость запаздывания реакции организма, находящегося в цепи биологической обратной связи, на устойчивость системы управления;

– выявлены основные выходные признаки с позиций информативности, временных задержек и взаимообусловленности, способствующей снижению формирования времени реакции.

**Список литературы:**

1. Косоверов Є.О., Тишук М.М., Мещеряков В.І., Веселкова Т.О. Деклараційний патент № 58051А (Україна). Спосіб пелюїдотерапії та камера для його здійснення.
2. Громов Ю.Ю., Земский Н.А., Лагутин А.В., Иванова Щ.Г. Системы автоматического управления с запаздыванием. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. ун-та, 2007. 76 с.
3. Баркин А.И. Устойчивость линейных систем с запаздыванием. Автоматика и телемеханика, № 3, 2006. С. 3–7.
4. Wang Q.-G. PID Control for MIMO Processes. PID Control in the Third Millennium, Advances in Industrial Control. London: Springer, 2012. P. 177–204.
5. Ильясов Б.Г., Сайтова Г.А., Сабиров И.И. Управление многосвязными системами с запаздыванием на основе логических регуляторов. XII Всероссийское совещание по проблемам управления. Москва: ВСПУ. 2014. С. 1370–1376.
6. Жуков И.А. Анализ устойчивости систем управления корпоративными компьютерными сетями при наличии задержек доставки управляющей информации. УСиМ, № 5, 2010. С. 46–51.
7. Туманов М.П. Исследование устойчивости и качества замкнутых распределенных систем с переменным запаздыванием в сетевой компоненте. Материалы 6-й научной конференции «Управление и информационные технологии (УИТ–2010)». 2010. 50 с.
8. Акулов С.А., Федотов А.А. Основы теории биотехнических систем. Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2014. 259 с.
9. Барнацкий В.В. Пелюїдотерапия различных температурных режимов в восстановительном лечении больных серонегативными спондилоартритами. Вопросы курортологии, физиотерапии и лечебной физической культуры, № 2, 2007. С. 7–12
10. Бокселл Дж. Изучаем Arduino. 65 проектов своими руками. Изд. дом ПИТЕР, 2016. 400 с.
11. URL: <https://blogs.msdn.microsoft.com/sos/2015/07/09/microsoft-arduino/>

**АНАЛІЗ ВПЛИВУ ЗАПІЗНЕННЯ НА СТІЙКІСТЬ СИСТЕМИ З БІОЛОГІЧНИМ ЗВОРОТНІМ ЗВ'ЯЗКОМ**

*Розглянуто вплив часу запізнєння перетворєння інформації на стійкість системи регулювання з біологічним зворотнім зв'язком. Проаналізовано реакції організму на стрибкоподібну інфрачервону дію з урахуванням інформативності й часу формування. Показано, що мобільні пристрої дистанційного перетворювання даних вносять значущу часову невизначеність, яка впливає на якість управління. Запропоновано шляхи зниження і компенсації впливу запізнєнь.*

**Ключові слова:** біологічний зворотній зв'язок, час формування, інформаційні ознаки, управління.

**ANALYSIS OF LAGING INFLUENCE ON THE SYSTEM SUSTAINABILITY WITH BIOLOGICAL FEEDBACK**

*It was considered the influence of the time lagging of information transformation on the sustainability of the control system with biological feedback. It was analyzed organism reactions to the stepwise infrared influence due to their in formativeness and time formation. It was shown that mobile remote data conversion devices introduce a significant temporary uncertainty affecting the quality of control. Ways to reduce and compensate the effects of sustainability were offered.*

**Key words:** biological feedback, time formation, informative features, management.



*Пасічна М.В.*

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

## ОПТИМІЗАЦІЙНЕ ТА ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СТРУКТУРИ ЕЛЕКТРОГЕНЕРУЮЧИХ ПОТУЖНОСТЕЙ ЕНЕРГЕТИЧНИХ КОМПАНІЙ

*У статті розглядаються методологічні і практичні аспекти застосування оптимізаційного та імітаційного моделювання для аналізу структури потужностей генерації електроенергії енергетичних компаній. Під час моделювання систем енергетики у більшості випадків використовуються універсальні інструментальні засоби. Вони базуються на оптимізаційних особливостях лінійного і нелінійного програмування, багато-критеріальному процесі прийняття рішень, генетичних алгоритмах та іншому. Головна увага у статті зосереджена на теорії і практиці моделювання структури генеруючих потужностей, класифікації наявних інструментів моделювання. Як приклад наводяться результати застосування програмних інструментів лінійного і нелінійного програмування для оцінки структури генеруючих потужностей в Україні.*

**Ключові слова:** оптимізаційне та імітаційне моделювання, інформаційна технологія, структура генеруючих потужностей, генерація електроенергії.

**Постановка проблеми.** Сегмент генерації електроенергії являє собою складову частину електроенергетичної галузі. Оскільки електроенергію можна виробляти на різних генераторах енергії (що використовують різні типи палива), то сферу генерації електроенергії умовно поділяють на тепло-, гідро- й атомну генерацію. Промислові підприємства, які забезпечують перетворення вихідної природної енергії в електричну, називаються електростанціями. Сьогодні в світі приблизно 80% виробництва здійснюється на базі теплової енергетики (70% на ТЕС (теплові електростанції), 20% на АЕС (атомні електростанції) і 10% на ГЕС (гідроелектростанції)). На інші види електростанцій, що використовують нетрадиційні та поновлювальні джерела енергії припадає незначна доля у виробництві електроенергії [1].

Так, відповідно до інформації Євростату [2] загальне виробництво електроенергії ЄС-28 (Європейський Союз-28) станом на 2015 р. досягло 3,07 млн ГВт-год (гіга-Ват-годин), де 48.1% – найбільша частка електроенергії – була згенерована на вугільних і газових електростанціях, 26.4% – за допомогою АЕС, 11.9% – на ГЕС, 9,7% та 3,5% – за допомогою ВЕС (вітрових електростанцій) та СЕС (сонячних електростанцій) відповідно.

В Україні відповідно до Державної служби статистики станом на 2015 р. було згенеровано 163,3 тис ГВт-год електроенергії, лівова частка якої (57,16%) припадала на АЕС; 30,86% електроенергії було вироблено ТЕС і ТЕЦ (теплоелектроцентралями), що працюють переважно на вугіллі; 4,51% –

на ГЕС та ГАЕС (гідроакумуючих станціях); ВЕС, СЕС і біомасні ТЕЦ виробили 0,68, 0,33 і 0,09 відсотків електроенергії відповідно [3].

Таким чином, структура генерації електроенергії може бути представлена як розподіл (диверсифікація) генеруючих потужностей (ГП) за типами технологій виробництва електричної енергії з розбивкою за видами палива. Вона показує статус часток різних джерел генерації електроенергії в загальному обсязі валового виробництва електроенергії. Залежно від складу структури ГП можна припустити рівень залежності країни від конкретних видів палива, рівень технічного прогресу, тенденцій щодо виснаження ресурсів, викидів CO<sub>2</sub> та інших парникових газів.

З огляду на це, зміни в сегменті генерації електроенергії, що відбуваються у зв'язку зі зношеністю і виведенням з експлуатації наявного електрогенеруючого обладнання, а також запровадженням інноваційних енергогенеруючих технологій, являють собою процес прийняття рішень в умовах багатоваріантності задач, їх багатомодельності, невизначеності і слабкої структурованості вхідних даних [4]. Фактор створення оптимальної або ефективної структури загальної встановленої електрогенеруючої потужності (ЗВЕП) електричних станцій є центральною проблемою урядів країн і менеджменту енергетичних компаній. Водночас технологічна диверсифікація, під якою розуміють впровадження інноваційних технологій генерації електроенергії, є однією зі складових частин оптимізації сектору електроенергетики [5].

Відповідно формується ряд задач, які необхідно розв'язати для забезпечення процесу автоматизації інтелектуального процесу прийняття рішень для сфери генерації електроенергії.

Поточні підходи до оцінки (оптимізації) структури генерації електроенергії базуються на програмних інструментах, основу яких становлять елементи сучасної теорії портфеля Марковіца (середнє значення розподілу ймовірностей, MVP – Mean Variance Portfolio) [6], елементи теорії нечітких множин [7], положення теорії корисності [8], задачі лінійного та нелінійного програмування та інше. До того ж застосування оптимізаційного та імітаційного моделювання до комплексного аналізу енергогенеруючих потужностей в Україні є недостатньо вивченим. Зокрема, багато уваги приділяється вивченню оптимального завантаження енергоблоків на короткостроковий період (доба, тиждень, місяць) [9], оптимальному керуванню вітровими і сонячними установками [10, 11] та іншому.

**Метою** цієї статті є дослідження особливостей застосування програмних інструментів оптимізаційного та імітаційного моделювання для оцінки структури генеруючих потужностей компаній, що виробляють електроенергію на території України.

#### **Викладення основного матеріалу**

### **1. Економіко-математичне моделювання в енергетиці**

Поступова інтеграція традиційних й альтернативних (відновлюваних) джерел генерації електроенергії залежить від комбінації багатьох внутрішніх (техніко-економічні показники технологій, ресурси енергогенеруючої компанії) і зовнішніх (державне регулювання, економічна ситуація в країні) факторів впливу, нових умов та підвищених вимог для роботи енергогенеруючих компаній (підвищення енергоефективності і зменшення впливу на довкілля, забезпечення енергетичної безпеки), розвитку інтелектуальних систем підтримки управлінських рішень та інше [12, 13].

Таким чином, сфера генерації електроенергії являє собою складну систему кібернетичного типу, володіє багатьма рисами нестаціонарних систем, пов'язаних із розподіленістю структури, багатовимірністю і невизначеністю параметрів, що визначають стан і умови їх функціонування. Проектування таких систем вирішується в умовах нечітко окреслених цілей і обмежень, нечітких і невизначених даних, а також нечіткості завдання пріоритету окремих критеріїв [14].

З огляду на сучасні підходи до енергетичного моделювання (рис. 1), можна провести класи-

фікацію за такими трьома ознаками. По-перше, оскільки серед всієї множини задач вибору, що виникають під час дослідження складних систем, завжди актуальною є задача пошуку оптимального рішення, за кількома критеріями та в умовах певних обмежень застосовується оптимізаційне моделювання. Оптимізаційне моделювання дає можливість вибрати кращий стан системи з множини допустимих рішень, але вимагає, як правило, великої кількості вхідних даних і розв'язок моделі не завжди може бути якісно інтерпретовано.

Задачі оптимізації процесів в сегменті генерації електроенергії направлені в основному на:

- визначення такого набору енерготехнологій, який сприятиме зменшенню витрат генерації в умовах таких обмежень, як, наприклад, покриття попиту, вичерпність енергоресурсів, обмежений характер розповсюдження інновацій, квоти на викиди і так далі [15];

- знаходження «екологічно» оптимального завантаження енергоблоків з урахуванням обмежень на екологічні фактори енергосистеми та можливості маневруванням навантаженням енергоблоків [9].

По-друге, в зв'язку з тим, що під час запровадження технологій відбувається вплив так званих факторів зовнішнього середовища, постає питання імітації поведінки учасників ринку електроенергії під впливом таких факторів, як ціни на електроенергію, рівень доходів та інших. Як правило, тип моделювання допомагає зрозуміти, на яких умовах і в який спосіб можна зазнати невдачі, і яким навантаженням (бар'ерам) можна протистояти. Імітаційне моделювання не обмежується «оптимальною» поведінкою. Водночас сценарії розвитку подій на майбутнє є чутливими до початкових умов і вхідних параметрів.

По-третє, оскільки галузь електроенергетики напряму залежить від кінцевого споживання електроенергії в різних секторах економіки, то застосовуються моделі звітності (за кінцеве споживання електроенергії). Цей вид моделювання в першу чергу засновано на проектуванні відносин і чітких припущеннях про майбутнє (удосконалення технології в частині техніко-економічних показників, частка охоплення ринку та інше). Дане моделювання можна також віднести і до гібридного, оскільки математичний апарат базується на лінійному програмуванні, може бути доповнений симуляційним моделюванням, а також застосовуватись підхід багато-критеріального прийняття рішень. Особливістю моде-

лей звітності, зокрема LEAP, є те, що користувач вказує очікувані результати, а інструмент управляє даними та аналізує вплив результату на певний «що, якщо» енергетичний сценарій. Отже, особливістю моделювання є те, що замість моделювання результату відбувається аналіз наслідків тих чи інших вже прийнятих рішень (сценаріїв).

Основу всіх цих підходів становить побудова цільової функції, що являє собою функцію мети, і

на кожен змінну якої встановлюються певні обмеження і визначається область допустимих (граничних умов).

Контекстна діаграма інформаційної технології (ІТ), що описує процеси зі збору різнотипних розрізнених вхідних даних, механізмів їх збору і обробки, управління цими даними на основі математичного і програмного забезпечення, на якому базується вищенаведене моделювання, представлена на рис. 2.

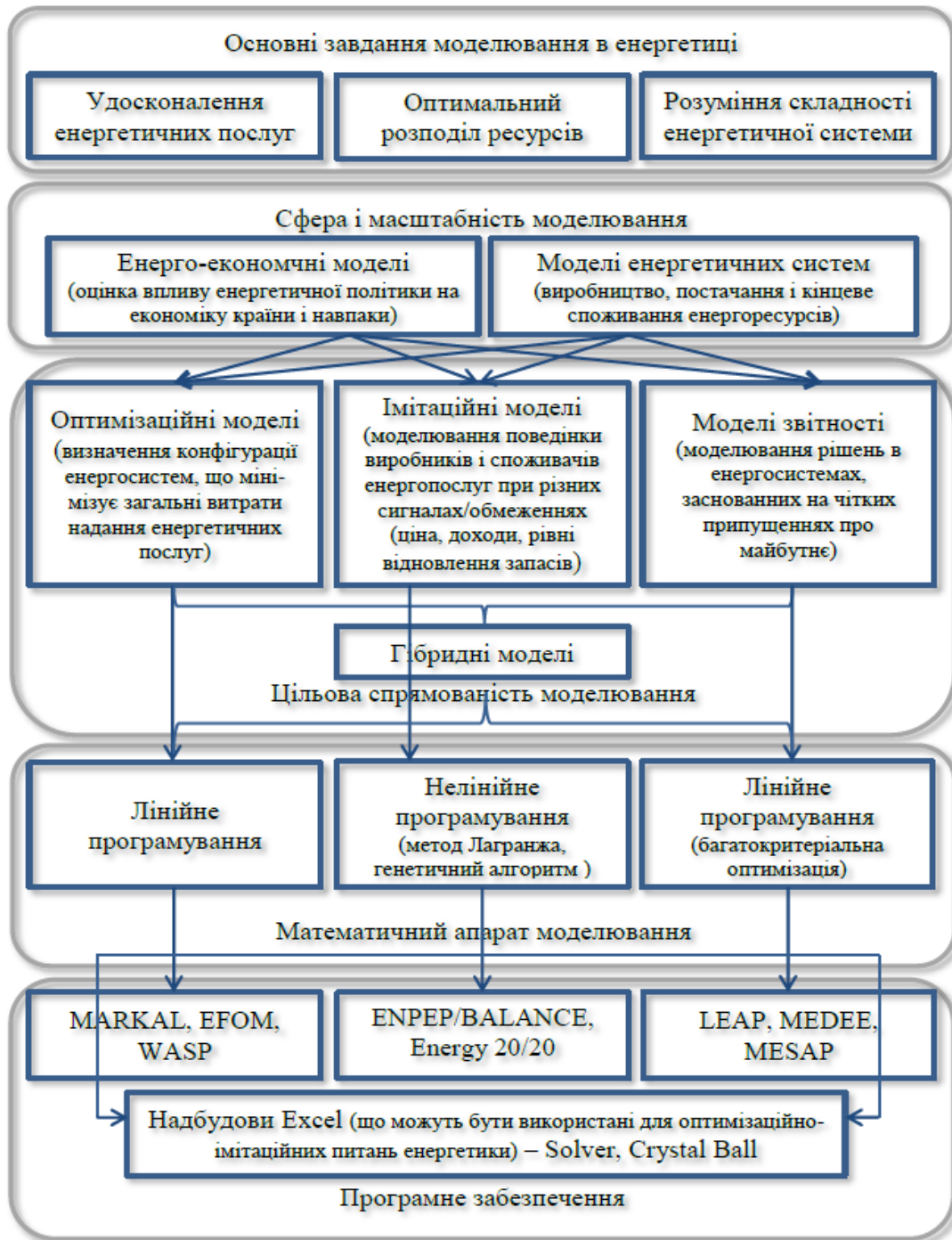


Рис. 1. Класифікація методів моделювання в енергетиці

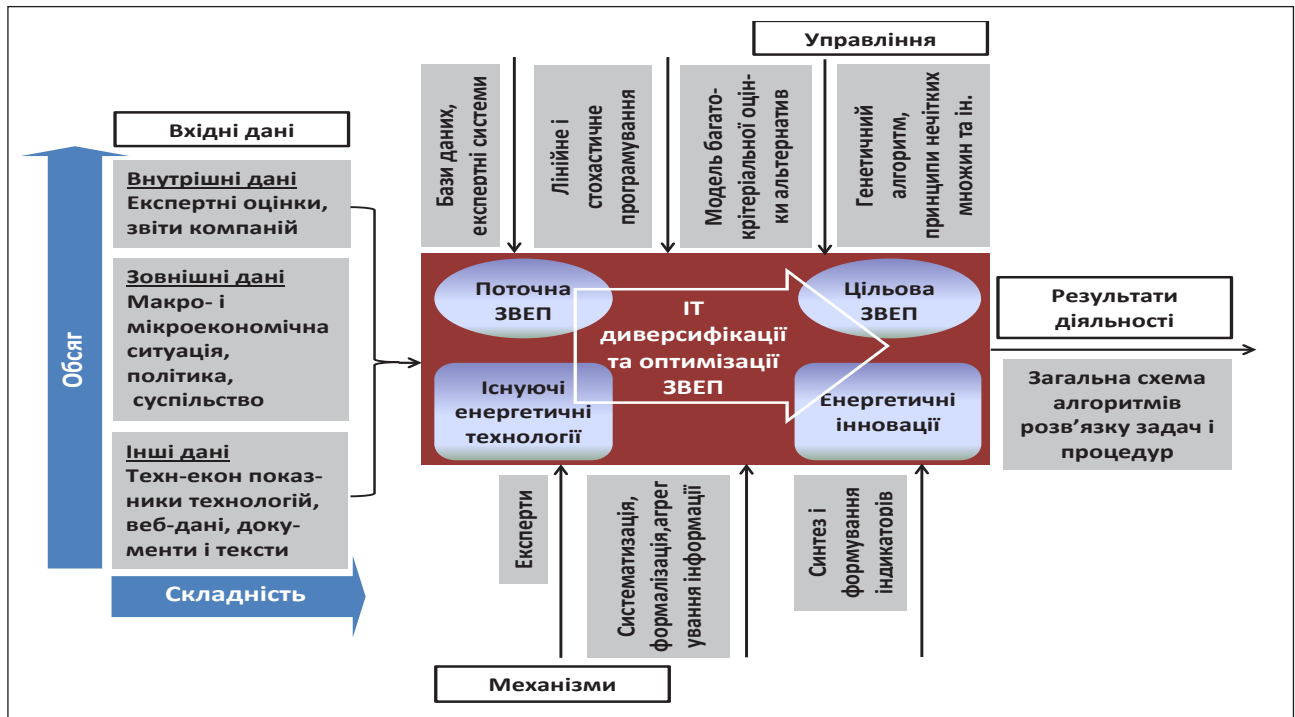


Рис. 2. Концептуальна схема інформаційної технології та складових частин програмного забезпечення диверсифікації та оптимізації структури загальної встановленої електрогенеруючої потужності

## 2. Застосування програмних інструментів лінійного і нелінійного програмування для структури генеруючих потужностей в Україні

Моделювання найменш вартісного розширення генеруючих потужностей електроенергії можна проводити в контексті оптимального розподілу потужностей та обсягу інвестицій за видами технологій. Для цього було застосовано програмний інструмент довгострокового планування із запровадження альтернативних джерел енергії LEAP [16] (рис. 3) та надбудова Excel – Crystal Ball [17], які базуються на принципах оптимізаційних особливостей лінійного програмування та стохастичної оптимізації відповідно.

**LEAP.** LEAP (Long-range Energy Alternatives Planning System<sup>1</sup>) являє собою інтегровану систему сценарного моделювання, що використовує оптимізаційні особливості лінійного програмування системи OSeMOSYS (Open Source Energy Modelling System<sup>2</sup>), яке спирається на мову програмування з відкритим вихідним кодом (GNU MathProg) і базується на GLPK (GNU Linear Programming Kit<sup>3</sup>).

Алгоритм розрахунків в LEAP побудовано навколо обчислення так званих модулів – попиту

на електроенергію з боку секторів кінцевого споживання електроенергії (КСЕ), перетворення електроенергії, основних первинних та вторинних енергоносіїв, що споживаються.

Основними припущеннями в моделюванні є величини ВВП, доходу та кількості населення, кількості та розміру приватних домогосподарств (ПД). Моделювання охоплює чотири сектори КСЕ: приватні домогосподарства, промисловість, транспорт та послуги. Сектор ПД враховує електрифіковані будинки; промисловість включає хімічний і нафтохімічний, металургійний та целюлозно-паперовий сектори; транспорт покриває пасажирський і вантажний, як автомобільний, так і залізничний; сектор послуг включає будівлі комерційного призначення (нежитлового фонду). До модуля перетворення енергії входить виробництво електроенергії, власне використання електроенергії на електростанціях, втрати електроенергії та природного газу під час передачі та розподілу електроенергії. Вугілля, природний газ, гідроенергія, вітроенергія, сонячна енергія, біоенергія та атомна енергія прийняті за первинні енергоресурси, дизель, газолін і електроенергія – за вторинні енергоресурси.

Хронологія прогнозування LEAP становить з 2015 р. (базовий рік) по 2030 р. Прогнози включають «Базовий», «Європейський» та «Оптималь-

<sup>1</sup> Система довгострокового планування із запровадження альтернативних джерел енергії

<sup>2</sup> Система моделювання енергетики з відкритим кодом

<sup>3</sup> Лінійний набір програм GNU

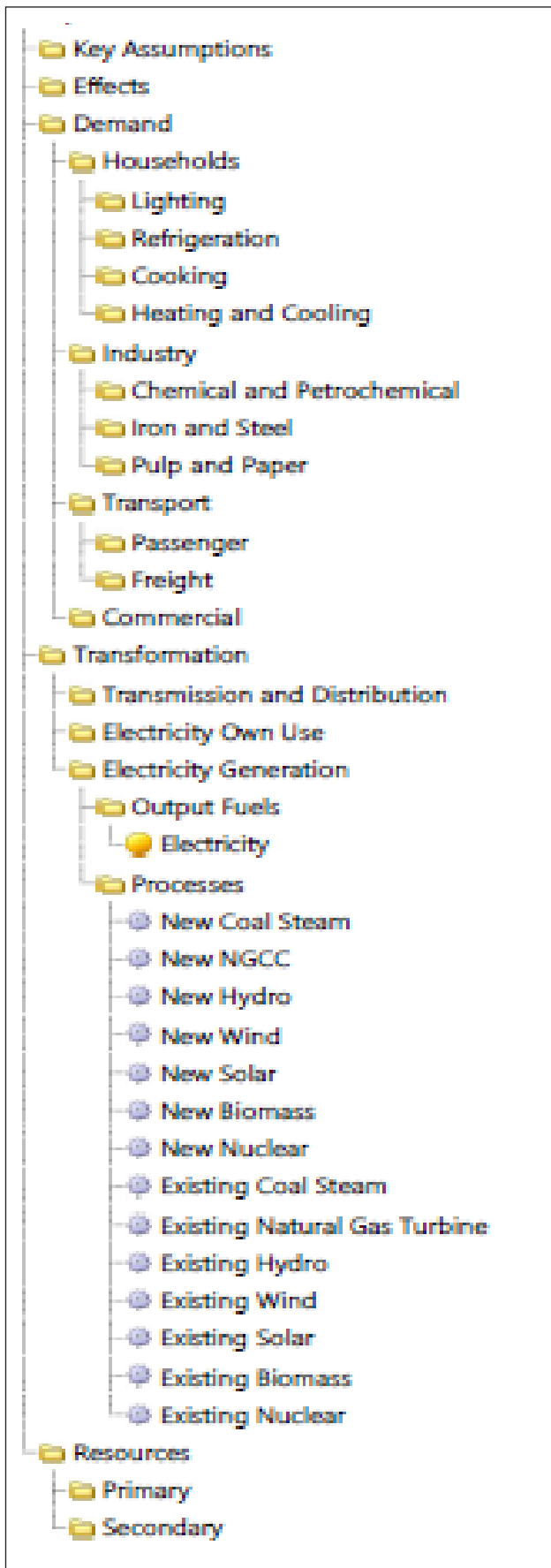


Рис. 3. Ієрархічне дерево LEAP (модулі та відповідні їм гілки)

ний» сценарії (БСц, ЄСц і ОСц відповідно). БСц забезпечує такий економічний розвиток, який слідує минулим тенденціям: падіння ВВП на 2,8% протягом року, поступове падіння чисельності населення, повільне зростання доходів населення, падіння кількості приватних домогосподарств. У сфері КСЕ на стороні ПД відбувається повільне падіння споживання твердих видів палива та електроенергії, в промисловості спостерігається падіння попиту на електроенергію в середньому на 1.3% в рік зі зменшенням використання вугілля та електроенергії проти збільшення використання природного газу (ПГ) і ВДЕ. В секторі транспорту – зростання споживання дизеля та електроенергії та падіння споживання газоліну, а також зменшення використання енергії (тверді палива і природний газ) в сфері послуг.

У сфері перетворення енергії, втрати ПГ становлять в середньому 20% для України, втрати електроенергії приймаються (за відсутності інформації) за 0%. Відбувається помірне зростання майже всіх видів генерації, за виключенням атомної.

ЄСц демонструє більш амбітні цілі (порівняно із БСц) в плані економічного зростання, покращення енергоефективності, прискореної відмови від використання викопних палив і атомної енергії, переході до споживання ВДЕ і так далі. ЄСц відрізняється від БСц у частині росту ВВП (0,5%), не спостерігається падіння кількості населення. В сфері КСЕ спостерігається стрімке падіння споживання електроенергії приватними домогосподарствами (-60% – освітлення, -50% – використання холодильників, -42% – приготування їжі, -30% – нагрів і охолодження помешкань) і ПГ; водночас зростає споживання вугілля. В промисловості відбувається зниження використання твердих видів палива (1,1% на рік) і зростання (на 0.5% на рік) використання ПГ, сонячної енергії, біомаси та електроенергії. На транспорті (пасажирські автомобілі) споживання дизеля і газоліну скорочується на 34 і 20 відсотка відповідно за період 2015–2030 рр., частка електромобілей зростає до 5% на 2030 р. На вантажних автомобільних перевезеннях споживання дизеля скорочується на 6% на рік. У сфері послуг споживання ПГ і електроенергії за період 2015–2030 рр. падає на 33% і 50% відповідно. Втрати ПГ зменшуються вдвічі. Обсяг встановленої потужності в Україні зростає, окрім атомної (яка зменшується майже вдвічі).

Дані для БСц були запозичені з розробленого заздалегідь базового сценарію за допомогою моделі «TIMES-Ukraine» [18]. Тенденції ЄСц

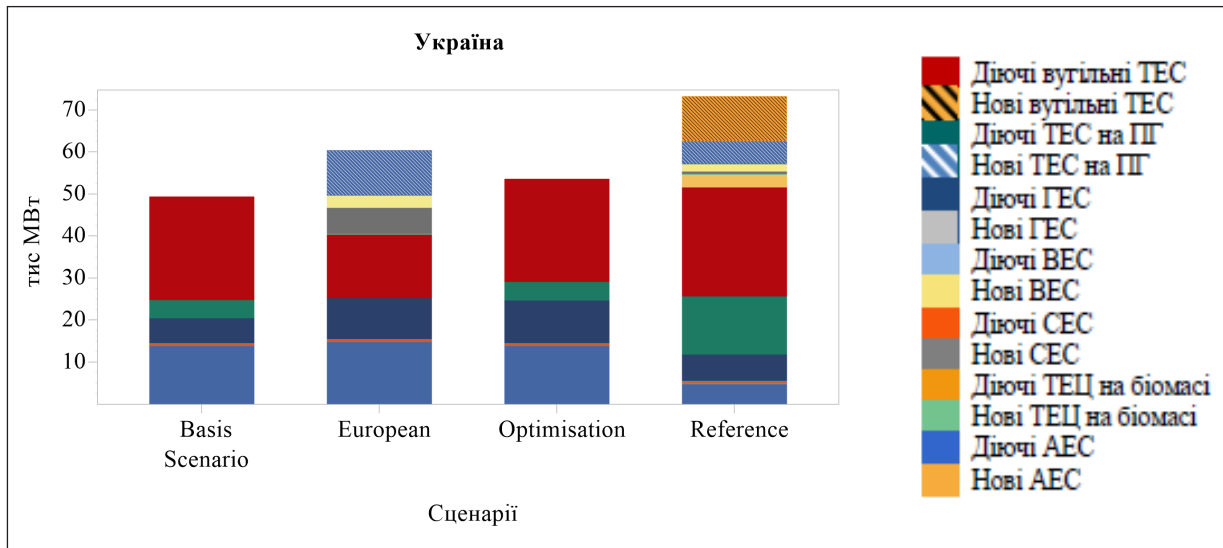


Рис. 4. Прогноз структури ЗВЕП із розбивкою за видами палива на 2030 р. для України; Basis Scenario – ситуація на 2015 р., European – Європейський сценарій, Optimization – Оптимальний сценарій, Reference – Базовий сценарій

ототожнюються із цілями, заявленими в Енергетичній стратегії України на період до 2035 року [19]. У разі відсутності необхідних даних було розраховано лінійний прогноз, що базується на тенденціях за період 2010–2015 рр. Викиди забруднюючих речовин та вплив на навколишнє природне середовище, що є результатом використання технологій генерації електроенергії на основі викопних палив, розраховуються за допомогою LEAP на основі коефіцієнтів викидів, запропонованих МГЕЗК<sup>4</sup>.

З метою знаходження найбільш оптимального складу електрогенеруючих потужностей (побудови ОСц), що мінімізує витрати на генерацію, задовольняючи водночас необхідний попит, враховуючи коливання добових навантажень роботи енергосистеми, а також навантаження на довкілля (викиди) було застосовано лінійне програмування системи OSeMOSYS методу оптимізації LEAP [20].

Цільова функція OSeMOSYS представлена наступним рівнянням:

$$\text{Min} \sum_y \sum_t \sum_r TC_{y,t,r} = OC_{y,t,r} + CC_{y,t,r} + EP_{y,t,r} - SV_{y,t,r} \forall y, t, r,$$

де TC, OC, CC, EP, SV являють собою дисконтовані (5%) загальну вартість, експлуатаційні витрати, капітальні витрати, штраф за викиди забруднюючих речовин від використання енергогенеруючих технологій та вартість виведення енергогенеруючих станцій з експлуатації відповідно; y, t, r – індекси року, технології та регіону відповідно.

<sup>4</sup> Міжурядова група експертів з питань змін клімату

Обмеження цільової функції стосуються величин мінімальної та максимальної потужностей, соціальної чи економічної діяльності, для якої споживається електроенергія, резервної потужності та викидів (NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub>).

Враховуючи прогноз падіння попиту на електроенергію зі сторони секторів КСЕ, а також враховуючи ціль знаходження найменш вартісного рішення для навантаження та розширення ГП, LEAP передбачає наступну оптимальну структуру потужностей генерації електроенергії (ОСц) на 2030 р. (рис. 4). Як видно, ОСц значно відрізняється від БСц та ЄСц, призводить до досить помірного збільшення потужностей і переважно в частині електростанцій, що працюють на гідроенергії. Натомість в ЄСц планується розширення потужностей, що працюють на ПГ, а також СЕС і ВЕС шляхом скорочення вугільної генерації. Водночас в контексті витрат ЄСц є в два рази дорожчим за ОСц.

Ці результати можна пояснити тим, що ОСц є сценарієм найменших витрат, за винятком обмежень, накладених на мінімальний і максимальний рівні встановленої потужності (відповідно до цілей країни).

З іншого боку, це все вказує на те, що падіння попиту на електроенергію та нестабільна економіка призводять до занадто великого обсягу потужностей (за резервної потужності понад 40% під час максимального попиту). Ці результати треба ретельно вивчати, оскільки відсутні дані про витрати, пов'язані із розширенням потужностей ГЕС, і модель не враховує рівень зношеності генеруючих потужностей.

**Crystall Ball.** Програмне забезпечення Crystall Ball є результатом реалізації технології розсіяного пошуку (scatter search), налаштовуючи його операцію до контексту оптимізації імітацій. Система шукає найкраще можливе рішення задачі оптимізації, яке визначається набором вхідних факторів для імітаційної моделі. Базою даного ПЗ є метаврестична оптимізація.

дніх років та ймовірнісний бюджет на майбутні періоди).

Відповідно до результатів моделювання Crystal Ball (OptQuest) (табл. 2) лівова частка бюджету припадає на генерацію на основі атомної енергії, а також вугілля. До того ж більша частка бюджету, як правило, припадає на технології, яким притаманний більший ризик (1/LCOE) в плані економічної ефективності.

Таблиця 2

**Розподіл ймовірнісного бюджету (2 млрд. грн) за типами технологій, а також показник ефективності генерації електроенергії (МВт/Євро) для генеруючих потужностей України**

	частка бюджету	МВт/Євро (1/LCOE)
Вугілля	16,5%	0,015
Природний газ	0,0%	0,009
Гідро-енергія	13,6%	0,034
Вітрова енергія	0,1%	0,004
Сонячна енергія	0,1%	0,004
ТЕЦ на біомасі	0,1%	0,003
Атомна енергія	69,5%	0,039

**Висновки.** Підсумовуючи, слід зазначити, що Оптимальний сценарій відповідно до LEAP, як видається, є сценарієм найменших витрат порівняно з іншими створеними сценаріями, якщо не існує обмежень на встановлену потужність та резервну маржу. Моделювання LEAP не враховує витрати на розробку мереж передачі та розподілу, а також витрати, пов'язані з реконструкцією та модернізацією електростанцій. Детальне уявлення про кінцевий попит на енергію є важливим детермінантом прогнозування в LEAP.

Вхідні дані моделювання охоплюють сім видів палива (вугілля, природний газ, гідроенергія, вітроенергія, сонячна енергія, біоенергія та атомна енергія), витрати на виробництво електроенергії (LCOE), мінімальний й максимальний рівні інвестицій у технології (тенденції попере-

Програмне забезпечення Crystal Ball (OptQuest) показує здатність системи знаходити оптимальні та найближчі оптимальні рішення за лічені хвилини. Водночас розрахунки є досить чутливими до вхідних даних.

В обох випадках оптимізаційно-імітаційного моделювання найбільш ефективний і оптимальний сценарій розвитку генеруючих потужностей відповідно до запропонованого моделювання не завжди співпадає із політикою урядів країн та стратегічних планів енергетичних компаній.

**Список літератури:**

1. Беляев Л.А., Заворин А.С., Тайлашева Т.С. Тепловые электрические станции: учебное пособие. Томск: STT, 2011. 342 с.
2. Eurostat. URL: <http://ec.europa.eu/eurostat> (last access: 11.01.2018) - Eurostat.
3. Конеченков А. Европейский энергобаланс – по какому пути развития идут Евросоюз и Украина? Терминал, 2016. Вип. 11. С. 11–13.
4. Стецюк П.І., Журбенко М.Г., Лиховид О.П. Математичні моделі та програмне забезпечення в задачах енергетики. Київ: Національна академія наук України, інститут кібернетики ім. В.М. Глушкова, 2012. 64 с.
5. Степанова А. Диверсифікація енергетичної залежності країни. Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Серія: економіка, 2016. Вип. 2. С.78–85.
6. Lang J., Madlener R. Portfolio Optimization for Power Plants: The Impact of Credit Risk Mitigation and Margining. Institute for Future Energy Consumer Needs and Behavior (FCN), E. ON ERC, RWTH Aachen University, 2010.
7. Madlener R., Glensk B., Weber V. Fuzzy Portfolio Optimization of Onshore Wind Power Plants. Institute for Future Energy Consumer Needs and Behavior (FCN), E. ON ERC, RWTH Aachen University, 2014.
8. Шулима О.В., Шендрік В.В., Давідсон П. Формалізація задачі прийняття рішень для вибору оптимальної структури гібридної енергетичної системи. Вісник НТУ «ХП». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. Харків: НТУ «ХП», 2016. Вип. 49(1221). С.62–69.
9. Стецюк П.И., Лиховид А.П., Чумаков Б.М. Математические и программные средства моделирования и оптимизации динамической загрузки мощностей энергосистемы. Отчет о научно-исследовательской работе № гос. регистрации 0107U004963. Киев: Ин-т кибернетики им. В.М. Глушкова НАН Украины, 2009. 136 с.
10. Щур І.З., Щур В.І. Оптимальне керування вітроустановками різної потужності в умовах турбулентних вітрів. Національний університет «Львівська політехніка», кафедра ЕАП, 2012. С. 146–152.

11. Кузнецов М.П., Ужейко С.О. Імовірнісні аспекти використання відновлюваних джерел енергії в зоні відчуження Чорнобильської АЕС. Відновлювальна енергетика, 2016, вип. 3. С. 6–12.
12. Sagar A. Assessing the global energy innovation system: some key issues. Energy Policy, 2002, No. 30. P. 465–469.
13. Clerens P., Farley M., Jazbec L. Thermal Power in 2030. Added value for EU Energy Policy, 2015. 44 p.
14. Макаров И.М., Виноградская Т.М., Рубчинский А.А. Теория выбора и принятия решений. Москва: Наука, 1982. 328 с.
15. Leibowicz B., Krey V., Grubler A. Representing spatial technology diffusion in an energy system optimization model. Technological Forecasting and Social Change, 2016, No. 103. P. 350–363.
16. LEAP. Stockholm Environment Institute. 2012. URL: [http://sei-us.org/Publications\\_PDF/SEI-LEAP-brochure-Jan2012.pdf](http://sei-us.org/Publications_PDF/SEI-LEAP-brochure-Jan2012.pdf). - 12.12.2017.
17. Glover F., Kelly J., Laguna M. The OptQuest approach to Crystal Ball simulation optimization. 1998. URL: <https://www.researchgate.net/publication/267771945>.
18. Дячук О., Чепелев М., Подолець Р. Перехід України на відновлювану енергетику до 2050 року. ТОВ «АРТ КНИГА», 2017. 88 с.
19. Енергетична стратегія України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність». 2017. URL: <https://www.kmu.gov.ua/ua/npas/250250456>.
20. Howells M, Rogner H, Strachan N. OSeMOSYS: The Open Source Energy Modeling System: An introduction to its ethos, structure and development. Energy Policy, 2011, No. 39. P. 5850–5870.

#### **ОПТИМИЗАЦИОННОЕ И ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ЭЛЕКТРОГЕНЕРИРУЮЩИХ МОЩНОСТЕЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОМПАНИЙ**

*В статье рассматриваются методологические и практические аспекты применения оптимизационного и имитационного моделирования для анализа структуры мощностей генерации электроэнергии энергетических компаний. При моделировании систем энергетики в большинстве случаев используются универсальные инструментальные средства. Они базируются на оптимизационных особенностях линейного и нелинейного программирования, многокритериальном процессе принятия решений, генетических алгоритмах и другом. Главное внимание в статье сосредоточено на теории и практике моделирования структуры генерирующих мощностей, классификации существующих инструментов моделирования. В качестве примера приводятся результаты применения программных инструментов линейного и нелинейного программирования для оценки структуры генерирующих мощностей в Украине.*

**Ключевые слова:** оптимизационное и имитационное моделирование, информационная технология, структура генерирующих мощностей, генерация электроэнергии.

#### **OPTIMIZATION AND SIMULATION MODELING OF THE STRUCTURE OF ELECTRICITY GENERATION CAPACITIES OF ENERGY COMPANIES**

*The article deals with the methodological and practical aspects of the application of optimization and simulation modeling for the analysis of the structure of electricity generating of energy companies. In most cases, while modeling energy systems the universal tools are used. They are based on optimization features of linear and nonlinear programming, multi-criteria decision-making process, genetic algorithms, etc. The main attention in the article is focused on the theory and practice of modeling of the structure of generating capacities, the classification of existing modeling tools. As an example, the results of application of linear and non-linear programming tools for estimating the structure of generating capacities in Ukraine are presented.*

**Key words:** optimization and simulation modeling, information technology, structure of generation capacities, generation of electric power.



УДК 004.738.5

**Пелешишин А.М.**

Національний університет «Львівська політехніка»

**Вус В.А.**

Національний університет «Львівська політехніка»

**Марковець О.В.**

Національний університет «Львівська політехніка»

## ПОБУДОВА ФОРМАЛЬНОЇ МОДЕЛІ ВІРТУАЛЬНИХ СПІЛЬНОТ ЯК СЕРЕДОВИЩА СОЦІОКОМУНІКАТИВНОГО ПРОТИБОРСТВА

*У статті запропоновано формальну модель віртуальної спільноти як середовища соціокомунікативного протиборства для захисту інформаційного простору держави. Визначено правила організації контенту у соціальних середовищах Інтернету. Подано характеристики віртуальних спільнот та об'єднано їх у групи. Кожна характеристика має свої показники, що відповідають її змісту.*

**Ключові слова:** соціальні середовища Інтернету, захист інформації, показники віртуальної спільноти, учасники спільноти, національна інформаційна безпека.

**Постановка проблеми.** У широкому спектрі завдань захисту національного інформаційного простору, адміністративної діяльності у сфері інформаційної політики, а також у завданнях інформаційно-аналітичної діяльності та моніторингу громадської думки виникає завдання обліку та каталогізації різних форм соціальних груп, що проводять свою діяльність у соціальних середовищах Інтернету (далі – ССІ). Із точки зору національної інформаційної безпеки значення та вплив суспільних групи у формі віртуальних спільнот постійно зростає, вони стають одним із головних засобів як індикації, так і формування суспільної думки на національному та регіональному рівнях.

Повноцінна каталогізація віртуальних спільнот вимагає опису значної кількості параметрів спільнот. Спільноти є складним об'єктом із точки зору інформаційного опрацювання, їхні характеристики потребують формалізації, категоризації та певної уніфікації в межах єдиної спеціальної моделі.

Формальна модель віртуальної спільноти частково наявна в окремих існуючих дослідженнях із каталогізації сайтів, проте сьогодні цей напрям досліджень (формування загальних каталогів сайтів переживає певну кризу). Імовірно, технічні параметри спільнот детально пропрацьовано в системах автоматизованого поширення рекламних повідомлень та пошукового спаму, проте з очевидних причин такі прикладні розроблення не мають наукового підґрунтя та опрацювання.

Проте і в указаних напрямках прикладних розробок, як показує аналіз результатів викорис-

тання, відсутня низка принципово важливих груп характеристик, необхідних для повноцінного використання спільнот як середовища інформаційної взаємодії.

Дослідимо додаткові показники, які б мали бути частиною формальної моделі предметної галузі – віртуальних спільнот як фактора національної безпеки. Аналіз будемо проводити у таких напрямках:

– характеристики віртуальних спільнот як середовища колаборативного обміну інформацією;

– додаткові характеристики спільнот як середовища інформаційної агресії.

Формалізація характеристик буде використана в спеціальних алгоритмах захисту від інформаційної агресії та основою для проектування структури програмного комплексу

**Аналіз досліджень та публікацій.** Веб-форуми та класичні персональні автономні (standalone) блоги історично є першими формами соціальних середовищ Інтернету, Веб-форуми фактично є прямим продовженням популярних до появи WWW інших форм спільнот, тому вони довгий час домінували в інформаційному просторі.

Із середини 2000-х інші форми ССІ почали створювати відчутну конкуренцію форумам та блогам, проте вони сьогодні не втратили актуальності (як суттєвий складник інформаційного простору). Особливо велике значення вони мають як певні регіональні площадки та як площадки для інформаційної діяльності відомих персоналій.

Сьогодні практично всі значущі форуми та блоги реалізуються на низці типових програмних платформ (часто вільновживаних) у вигляді автономних веб-сайтів. Цей підхід забезпечує використання глобальних пошукових систем у окремих завданнях державної безпеки (глибокий пошук важливого контенту, виявлення важливих спільнот). Використання цього інструментарію описано в наукових працях вітчизняних учених [1, с. 352; 2, с. 192; 3, с. 217; 4, с. 36; 5, с. 863].

Водночас автономність сайтів форумів та блогів суттєво ускладнює систему ідентифікації користувачів. На кожному сайті існують окремі логіни, як правило, поширена можливість анонімної (під псевдонімом) активної діяльності. Це і є одним із факторів, які сьогодні визначають популярність цього типу ССІ. Водночас із точки зору завдань інформаційної безпеки анонімність користувачів є відчутним викликом.

Із точки зору організації контенту у випадку форумів діють такі правила:

- коментарі об'єднано зі статтею у єдину дискусію;
- дискусії згруповано за розділами;
- упорядкування дискусій у розділах – хронологічне, свіжо коментовані зверху;
- упорядкування коментарів у дискусіях – хронологічне, нові знизу;

Для блогів мають місце такі правила:

- коментарі об'єднано зі статтею у єдину дискусію;
- дискусії згруповано за ключовими словами;
- упорядкування дискусій – хронологічне, свіжо створені зверху;
- упорядкування коментарів у дискусіях – хронологічне, нові знизу.

Ці правила важливі з огляду на тактику інформаційної протидії в ССІ і визначають доцільність і форму реакції на ті чи інші дописи.

**Постановка завдання.** Метою роботи є формалізація користувачів соціальних середовищ Інтернету з урахуванням особливостей завдань захисту інформаційного простору. Для цього запропоновано спеціальну модель віртуальних спільнот як середовища протиборства у інформаційному просторі. А також визначено низку характеристик, які згруповано у такі групи: технічну, аудиторну, суспільної значимості, змісту та комунікації.

**Виклад основного матеріалу дослідження. Технічні характеристики віртуальних спільнот.** Технічні показники характеристики віртуальних спільнот описують способи забезпечення її функціонування в мережевому середовищі: засоби хостингу, програмні засоби, мови розмітки, оформлення розміщених матеріалів, доступність зовні спільноти та для автоматизованих сервісів збору даних (таких як глобальні пошукові системи).

Зазначимо, що сьогодні існує два головні класи технічної організації спільнот:

- на базі автономних програмно-технічних платформ;
- на базі глобальних соціальних сервісів, зокрема соціальних мереж та спеціалізованих мультимедійних хостингів.

Із точки зору комунікативних процесів та впливу на інформаційний простір держави обидва підходи до організації спільнот є важливими і певною мірою схожими. На практиці основні відмінності між використанням обох типів середовищ в інформаційній діяльності і в процесах інформаційного протистояння лежать саме в програмно-технічній сфері. Пропонований далі перелік формальних показників є узагальненим для обох підходів, відмінності є лише між алгоритмами, що їх використовують, та ступенем програмної реалізації таких алгоритмів.

Таблиця 1

Технічні показники віртуальної спільноти (група СТ)

Показник	Позначення	Тип даних	Коментар
Тип платформи	СРТ	Список типів	(форум, мультимед. хостинг, соцмережа...)
Мережевий ідентифікатор платформи	СРІN	Universal resource identifier	Мережева адреса сайту платформи, головний URI платформи
Вербальний ідентифікатор платформи	СРІV	Рядок символів	Гасло або назва сайту платформи, за яким він знаходиться у разі зміни адреси
Мережева адреса спільноти	СІN	Universal resource identifier	Адреса головної сторінки спільноти
Вербальна адреса спільноти	СІV	Рядок символів	Гасло або назва спільноти, за яким він знаходиться у разі зміни адреси
Макрокод внутрішнього пошуку	СІSЕ	Код на мові програмування високого рівня	Спосіб пошуку в межах спільноти
Макрокод зовнішнього пошуку	СЕSЕ	Код на мові програмування високого рівня	Спосіб пошуку в межах спільноти

Характеристика *CIN* подається у форматі URI, урахувавши той факт, що всі реально функціонуючі сьогодні мережеві платформи дозволяють виділити певний унікальний URI для чільної сторінки спільноти. Теоретично можливе існування платформ, які такого виділення не дають. У такому разі воно повинне бути замінене парою «*CIV + CESE*».

Характеристики *CESE* та *CISE* (макрокоди пошуку) описують процедури пошуку в межах інформаційного наповнення спільноти в термінах, придатних для безпосередньої програмної реалізації. Одним із таких варіантів є шаблон фрагмента коду, який може бути викликаний з автоматизованих програмних засобів із заміною параметрів шаблону на конкретні пошукові терміни та переданий далі на виконання. Сам код може передбачати декілька етапів як підготовчого (логін у пошукову систему, розпізнавання CAPTCHA тощо), так і пошукового характеру (попередній та уточнюючий пошук, пошук різними мовами та алфавітами тощо).

В окремих випадках показники *CESE* та *CISE* принципово відрізняються. Завданням показника *CISE* є документування способу пошуку, який здійснюється (зокрема в частково автоматизованому режимі) засобами технічної реалізації спільноти. Тобто процедуру пошуку забезпечують власники платформи, на якій розгорнуто спільноту.

Показник «Макрокод зовнішнього пошуку» призначений для документування способу пошуку, слабо залежного від адміністрації платформи спільноти – за допомогою зовнішніх

щодо платформи сервісів, таких як пошукові системи.

У разі реалізації спільноти у формі традиційного Веб-форуму чи схожих (wiki-середовища, колективні блоги тощо) *CESE* достатньо подати шаблони стрічки розширеного пошуку з відповідними директивами локалізації пошуку (такими як *site:* чи *inurl:* для Google). Детально питання використання глобальних пошукових систем для пошуку у форумах пропрацьовано в наукових працях [6, с. 374; 7, с. 32; 8, с. 87].

Коли платформою використовується сервіс глобальної соціальної мережі, то засоби зовнішнього та внутрішнього пошуку є однаковими або близькими, зводяться до використання стандартних пошукових засобів соціальної мережі.

Усі значення технічних характеристик визначаються експертами під час аналізу спільноти. Такі показники, як *CISE* та *CESE*, є схожими для більшості спільнот, що функціонують на одній платформі.

Показники аудиторії віртуальних спільнот. Показники аудиторії віртуальних спільнот описують популярність спільноти серед користувачів Інтернету та її обсяги в різних аспектах. Ці показники є важливим фактором для оцінки важливості спільноти як середовища інформаційної взаємодії і протистояння агресії.

Учасниками спільноти вважатимемо осіб із зареєстрованими в спільноті обліковими записами, спостерігачами – зареєстрованих учасників без активності. Проте на окремих платформах є можливість окремої реєстрації як спостерігача (follower), а не учасника спільноти або підключення

Таблиця 2

Показники аудиторії віртуальної спільноти (група СА)

Показник	Позначення	Тип даних	Коментар
<b>Кількісні характеристики аудиторії</b>			
Кількість учасників	CAM	Натуральне число	
Кількість спостерігачів	CAAF	Натуральне число	
Кількість читачів	CAAR	Натуральне число	
Кількість активних учасників	CAAM	Натуральне число	
Кількість лідерів думки	CAOL	Натуральне число	Із високим особистим авторитетом
<b>Таргетингові характеристики</b>			
Мова спільноти	CCLang	Перелік мов	На основі правил спільноти
Регіон	CCReg	Перелік регіонів або країн	
Вік	CCAge	Домінуюча вікова група	
Вид діяльності	CCAct	Перелік видів	Фах, галузь активності
Реальність інфор. потреби	CCInt	[0,1]	[беззмістовний флейм. ділова комунікація]
Тематика спільноти	CCTh	Ключові слова	

чення до читання спільноти через окремі формати (типу стрічки новин у RSS-форматі). У такому разі для спільнот зі строгим регламентом активної участі та наявністю авторитетних осіб кількість спостерігачів може суттєво (на порядки) перевищувати кількість учасників.

У моделі пропонується розділяти поняття «спостерігач» та «читач». До спостерігачів належать ті користувачі Інтернету, які у якийсь зі способів використовують примусове доставлення нового контенту або його анонсів (push-технології). Реалізація такої доставки залежить від типу платформи (підписка на RSS-канал, отримання сповіщень у браузері, підписка у стрічці новин акаунта соціальної мережі, email-підписка, оповіщення робочого столу тощо), проте в будь-якому разі вона вимагає цілеспрямованих активних дій користувача з автоматизованого доступу до контенту.

Читачами вважатимемо користувачів Інтернету, які доступуються до контенту спільноти епізодично, без підписки, виходячи з наявності миттєвого зацікавлення, але не рідше одного разу на місяць. Можна стверджувати, що спостерігачі складають ту частину аудиторії, яку можна назвати «ядром» або ж «довіреною частиною».

Визначення показника *CAAR* (читачів) для одних типів платформ є тривіальним (Веб-форуми і інші автономні платформи), для інших – інколи можлива лише груба оцінка на основі показника *CAAF* (деякі соціальні мережі з обмеженим доступом до статистики, зокрема Фейсбук).

Для різних платформ методи і складність визначення показників аудиторії значно відрізняється. Так, лише показник *SAM* («кількість учасників») є легко доступним. Решту показників є складнішими і можуть бути визначені лише приблизно. Зазначимо, що інформативність показника *SAM* також залежить від типу платформи – для спільнот на платформі соціальних мереж він є важливішим, ніж для форумів унаслідок активного донесення інформації до користувача соціальної мережі (на відміну від форумів, у яких власники акаунтів за замовчуванням не отримують додаткових сповіщень).

Окремим питанням є визначення поняття «активний учасник». Воно також залежить від типу платформи, на якій функціонує спільнота. У будь-якому разі активним вважатимемо учасника, який здійснює певну документовану дію щодо контенту спільноти в межах її платформи. Так, у разі побудови спільноти на інфраструктурі соціальної мережі необхідно враховувати активні дії у формі «лайків», тоді як на традиційних форумах вони

відсутні. У будь-якому разі активними діями вважатимемо розміщення текстового коментаря до існуючого контенту та початок нової дискусії.

Лідерами думки (opinion leaders) вважатимемо окремих учасників зі високим рівнем суспільного пріоритету та персоналізацією, яка проявляється в таких формах:

- наявності окремого медійного статусу особи;
- високого політичного, державного, ділового чи іншого суспільного статусу особи;
- наявності високого мережевого статусу, що проявляється в наявності великої кількості друзів чи читачів у соціальних мережах, наявності популярного блогу тощо.

Виявлення лідерів думки в спільноті в загальному випадку є доволі складним завданням, проте здебільшого вона спрощується інформаційною політикою спільноти. Адміністрація спільнот анонсує або рекламує наявність таких персон серед учасників.

Коли такі суспільно значимі особи діють на форумі анонімно, в величині *CAOL* вони не враховуються, адже на спільноту цей вплив не поширюється.

Окремою підгрупою показників аудиторії спільноти є показники, які дозволяють здійснити таргетинг, виділити потенційно зацікавлених у спільноті з множини усіх користувачів Інтернету.

Набір показників є доволі традиційним, відповідає класичним способам таргетингу, що використовується в системах контекстної та цільової Інтернет-реклами. Тому набір можливих значень показників відповідає усталеним у галузі.

Показник «Реальність інформаційної потреби» відображає практичну цінність контенту, який створюється в спільноті на основі потреб користувачів. Низькі значення відповідають спільнотам, де переважають беззмістовні дискусії (флейм), високі – спільнотам, де задовольняються реальні інформаційні потреби (практичні поради, розміщення документальної інформації тощо).

**Показники суспільної значимості.** Якщо показники аудиторії вказують на масштаби впливу інформаційної діяльності спільноти всередині неї, на учасників спільноти, то показники суспільної значимості показують її вплив на зовнішнє середовище. Виділимо такі показники, які наведено далі у таблиці 3.

Цитування спільноти та посилення на спільноту є основними індикаторами, які вказують на авторитетність матеріалів спільноти серед усіх користувачів Інтернету. У разі цитування доступ до матеріалу здійснюється напряму, що підвищує

Показники суспільної значимості (група СІ)

Показник	Позначення	Тип даних	Коментар
Кількість посилань на контент спільноти	CILC	Натуральне число	У формі гіперпосилання
Кількість цитувань	CICC	Натуральне число	У формі цитати або запозичення тексту
Конкурентний рейтинг	CICR	Натуральне число	Місце у списку однотипних спільнот
Конкурентна частка аудиторії	CICP	[0;1]	

його важливість. Цитування, як правило, супроводжується посиланням.

Спосіб цитування визначається технічними особливостями типу платформи. Найбільш розширені засоби цитувань сьогодні є наявними в популярних соціальних мережах типу Фейсбук і в автоматичному режимі заміняють посилання на цитування.

Показник CICP «Конкурентна частка аудиторії» описує те, яку відносну частину цільової аудиторії має спільнота серед конкурентів. Можливим трактуванням цього показника є імовірність використання спільноти для здійснення необхідних дій користувачем Інтернету під час виникнення у нього потреб соціокомунікаційного характеру. Цей показник може бути визначений експертним шляхом або за допомогою опитування представників цільової аудиторії. Ще одним варіантом грубого визначення цього показника є використання суміжного з ним CICR.

Показник CICR «Конкурентний рейтинг», на відміну від частки аудиторії, описує лише умовну позицію серед конкурентів («головний», «другий» і так далі). Показник доволі легко встановлюється експертом. Головна цінність цього показника – можливість оцінити частку цільової аудиторії, яку охоплює спільнота та її кількісні характеристики, якщо відсутні інші способи або вони є надто трудомісткими. Для цього використаємо гіпотезу про те, що аудиторія розподіляється між рейтингованими спільнотами згідно із законом Зіпфа. У такому разі приблизна оцінка кількості читачів:

$$CAAR_i = \frac{CAAR(\bar{C}_m)}{CICR_i}, \quad (1)$$

де  $CAAR(\bar{C}_m)$  – показник кількості читачів найпопулярнішої з існуючих спільнот у межах цієї цільової аудиторії.

В аналогічний спосіб можна визначити й інші такі показники груп СА та СІ. Таким чином, показники спільноти-лідера стають певним еталоном за яким можна здійснювати оцінку інших спільнот.

Очевидно, отримані одним з указаних способів (експерти, опитування, рейтингова оцінка)

показники є неточними. Однак і в такому стані вони можуть використовуватися для широкого спектра завдань планування та організації захисту інформаційного простору держави, зокрема під час визначення трудомісткості, пріоритетності та резервування ресурсів.

Характеристики змісту та комунікації. Цей блок характеристик спільнот описує характер спільноти, її спрямування та призначення, чим визначає вибір щодо неї завдань із захисту інформаційного простору держави. Пропоновані показники цієї групи наведено у табл. 4

Головними завданнями прикладного значення, яким слугує формалізація та подальший облік показники змісту та комунікації, є:

- можливість побудови програмно-алгоритмічних засобів з елементами штучного інтелекту для виконання рутинних комунікативних процедур;
- розроблення та чітка формалізація процедур юридичного та адміністративного характеру щодо протистояння антизаконним діям;
- вибір комунікативних стратегій та вербальних технік для підвищення ефективності діяльності в спільноті.

Показник *CCPL* «Рівень персоніфікації» вказує на вимоги спільноти до визначення правдивості й повноти даних, що були подані учасником. У разі Веб-форумів цей показник визначається вимогами до назви акаунту та повноти заповнення реєстраційної анкети (в окремих випадках спеціального вітального повідомлення). У разі спільнот на платформі соціальних мереж ідентифікація учасника здійснюється за єдиним обліковим записом користувача, що не виключає технічну можливість використання фейкового акаунта. Тобто цей показник відображає ступінь готовності та бажання адміністрації спільноти верифікувати персональні дані учасників.

Показник *CCSN* «Акаунт соціальної мережі» відображає технічну можливість використання для реєстрації в спільноті зовнішній обліковий запис з основних соціальних сервісів.

## Характеристики змісту та комунікації (група СС)

Показник	Позначення	Тип даних	Коментар
<b>Правила реєстрації та ідентифікації</b>			
Рівень персоніфікації	CCPL	[0..1]	[анонімний...достовірний]
Акаунт соціальної мережі	CCSN	перелік соціальних мереж	
<b>Комунікативні характеристики</b>			
Рівень агресії	CCAgr	[0,1]	[неагресивний..агресивний]
Наявність порушень закону	CClaw	[0,1]	[відсутній..очевидно наявні]
Наявність ненормативної лексики	CCAdult	[0,1]	[відсутній..очевидно наявні]
Нестрогість модерації	CCMod	[0,1]	[премодерований ..немодерований]
Некерованість спільноти	CCCtrl	[0,1]	[повністю контрольована..неконтрольована]

Показники комунікативного блоку встановлюються експертним шляхом, хоча частково ця процедура може бути автоматизована за допомогою інструментарію автоматизованого опрацювання природномовних текстів, зокрема інструментів Sentiment та Opinion Mining.

Адміністрація спільнот не завжди контролює інформаційну діяльність спільноти, часто процеси і тематика формування контенту регулюються слабо. Показники CCMod «Строгість модерації» та CCCtrl «Керованість спільноти» відображають рівень прямої відповідальності та зацікавленості адміністрації у розміщенні матеріалів певної тематики, зокрема таких, що несуть загрозу державній безпеці і дозволяють приймати рішення з вибору інструментарію захисту.

Відмінність між CCMod та CCCtrl полягає в оцінці способів досягнення керованості спільноти – через прямий вплив модераторів чи через інші комунікативні інструменти (лідерів думок, психологічні маніпуляції тощо). Значні відмінності між цими показниками для одної спільноти є індикатором нетипової поведінки, яка вимагає детальнішого аналізу (як варіанти – агресивні «тролі» руйнують політику модерації, адміністрація штучно створює ілюзію неконтрольова-

ності спільноти з метою зменшення персональної відповідальності тощо).

Облік показників Cclaw та CCAdult дозволяє швидше приймати рішення щодо задіяння правових та адміністративних інструментів для регулювання дії спільноти.

Рівень агресії CCAgr описує загальну тенденцію щодо тональності та змісту висловлювань щодо опонентів, що наявна в спільноті. Цей показник також використовується у процесі прийняття рішень щодо стратегії і комунікативних технологій у роботі зі спільнотою.

**Висновки.** Формалізація віртуальних спільнот дозволить визначити низку формальних моделей суб'єктів інформаційної діяльності для посилення захисту інформаційного простору держави. Формалізація користувачів соціальних середовищ Інтернету, у якій враховано особливості завдань захисту інформаційного простору. Запропонована спеціальна модель віртуальних спільнот (як середовища протиборства у інформаційному просторі) дозволить точніше визначити джерела потенційної небезпеки для інформаційного простору держави, а запропоновані характеристики віртуальних спільнот та показники дозволять розробити стратегію інформаційного захисту відповідно до потенційної загрози.

## Список літератури:

1. Тимовчак-Максимець О.Ю. «Аналіз комунікативної взаємодії на веб-форумах: інформаційна поведінка та учасники». Інформаційні системи та мережі. № 699, 2011. С. 352–362.
2. Пелешішин А.М., Гумінський Р.В. «Загрози інформаційної безпеки держави в соціальних мережах». Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. 2(11). 2013. С. 192–199.
3. Пелешішин О.П. «Аналіз та протидія загрозам маркетинговій позиції підприємства в онлайн-спільнотах». Захист інформації. № 3 (15). 2013. С. 217–224.
4. Markovets O., Peleschyshyn A., «Modeling of Citizen Claims Processing by Means of Queuing System». International Journal of Computer Science and Business Informatics (IJCSBI). Vol. 15, № 1, 2015. С. 36–46.

5. Fedushko S., Syerov Yu., Korzh R., «Validation of the user accounts personal data of online academic community», IEEE XIIIth Intern. Conf. “Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science”, 2016. P. 863–866.

6. Тимовчак-Максимець О.Ю. «Моделювання оцінних суджень у дописах учасників веб-форумів», Інформаційні системи та мережі, № 673, 2010. С. 374–383.

7. Пелешишин О.П. «Облік та аналіз інформаційного наповнення онлайн-спільнот». Східно-Європейський журнал передових технологій. 1/2 (61), 2013. С. 32–35.

8. Пелешишин А.М., Корж Р.О., Яржа У.Б., «Захист інформаційного образу ВНЗ від цілеспрямованих дій у соціальних середовищах Інтернету». «Захист інформації». № 3 (56), 2012. С. 87–93.

#### **ПОСТРОЕНИЕ ФОРМАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ВИРТУАЛЬНОГО СООБЩЕСТВА КАК СРЕДЫ СОЦИОКОММУНИКАТИВНОГО ПРОТИВОБОРСТВА**

*В статье предложена формальная модель виртуального сообщества как среды социокоммуникативного противоборства для защиты информационного пространства государства. Определены правила организации контента в социальных средах Интернета. Даны характеристики виртуальных сообществ и объединены в группы. Каждая характеристика имеет свои показатели, соответствующие ее содержанию.*

**Ключевые слова:** социальные среды Интернета, защита информации, показатели виртуального сообщества, участники сообщества, национальная информационная безопасность.

#### **CONSTRUCTION OF THE FORMAL MODEL OF THE VIRTUAL COMMUNITY AS AN ENVIRONMENT OF SOCIO-COMMUNICATIVE DISPUTE**

*The article proposes a formal model of the virtual community as a medium of socio-communicative confrontation for the protection of the state information space. The rules for content organization in the social media of the Internet are defined. The characteristics of virtual communities are presented and grouped into groups. Each characteristic has its own indicators, corresponding to its content.*

**Key words:** Internet social media, information security, indicators of the virtual community, community members, national information security.

УДК 681.51

**Петросян А.А.**

Одеський національний політехнічний університет

**Давидов В.О.**

Одеський національний політехнічний університет

## **АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ ЖИВЛЕННЯ ПАРОВОГО КОТЛА ГМ-50**

*Упровадження систем автоматизованого управління паровими і водогрійними котлами, побудованих на основі програмованих контролерів, дозволяє автоматизувати процес виробництва теплової енергії в котлах і значно спростити контроль і управління цим процесом. Застосування такої системи підвищує ефективність функціонування котлоагрегату за рахунок зниження споживання енергоресурсів, раціонального спалювання палива, використання технологічного обладнання, оперативного управління обладнанням і технологічним процесом. Об'єктом проектування є автоматизована система управління технологічними процесами живлення парового котла ГМ-50.*

*Підтримання заданого рівня води в барабані є одним із найважливіших умов забезпечення надійної роботи обладнання. Актуальність полягає в тому, що підвищення рівня від нормального збільшує вологість пари, а іноді призводить до закиду води в пароперегрівник і турбіну.*

**Ключові слова:** автоматизована система регулювання, паровий котел, автоматизація, математична модель, передавальна функція.

**Постановка проблеми.** На підприємствах промисловості, де потрібна велика кількість теплової енергії у вигляді пари і гарячої води, котельні обладнані різноманітними паровими і водогрійними котлами, виробленими 30 і більше років тому.

Для управління процесами котли комплектувалися системами, побудованими на основі релейно-контактної автоматики, які до теперішнього часу морально і фізично застаріли. натеper на світовому ринку є повна різноманітність, зокрема мікроконтролерів для промислової автоматизації, призначених для тривалої роботи в різних умовах, а також розвинені комп'ютерні технології дозволяють створювати системи управління процесами, здатні функціонувати в автономному режимі.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Инвариантная система автоматического регулирования при плановом изменении нагрузки, структура которой выбирается на основе использования метода структурно-параметрической оптимизации динамических систем [6, с. 70–71]. В этой публикации было рассмотрено передаточную функцию устройства компенсации, что находят из условия инвариантности основной регулируемой величины по отношению к крайнему внешнему возмущению с учетом заданной передаточной функции системы по основной регулируемой величине.

**Постановка завдання.** Упровадження систем автоматизованого управління паровими і водогрійними котлами, побудованих на основі програмованих контролерів, дозволяє автоматизувати процес виробництва теплової енергії в котлах і значно спростити контроль і управління цим процесом. Застосування такої системи підвищує ефективність функціонування котлоагрегату за рахунок зниження споживання енергоресурсів, раціонального спалювання палива, використання технологічного обладнання, оперативного управління обладнанням і технологічним процесом. Крім того, впровадження таких систем дозволяє знизити вплив людського фактора у виробничому процесі та ймовірність виникнення аварійних режимів функціонування котла. Підвищення екологічних характеристик котельні й культури виробничого процесу.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Барабан (як об'єкт регулювання рівня) є системою ємностей, що складаються з власне барабана, опускної трубної системи й екранної трубної системи (підйомні труби). Ємності заповнені двофазним середовищем (вода і насичений пар).

Зміна рівня в таких системах відбувається під впливом двох факторів: через небаланс між притокою живильної води і стоком (відбором пари), через спінювання суміші бульбашками пара, головним чином, під час збільшення теплової потуж-



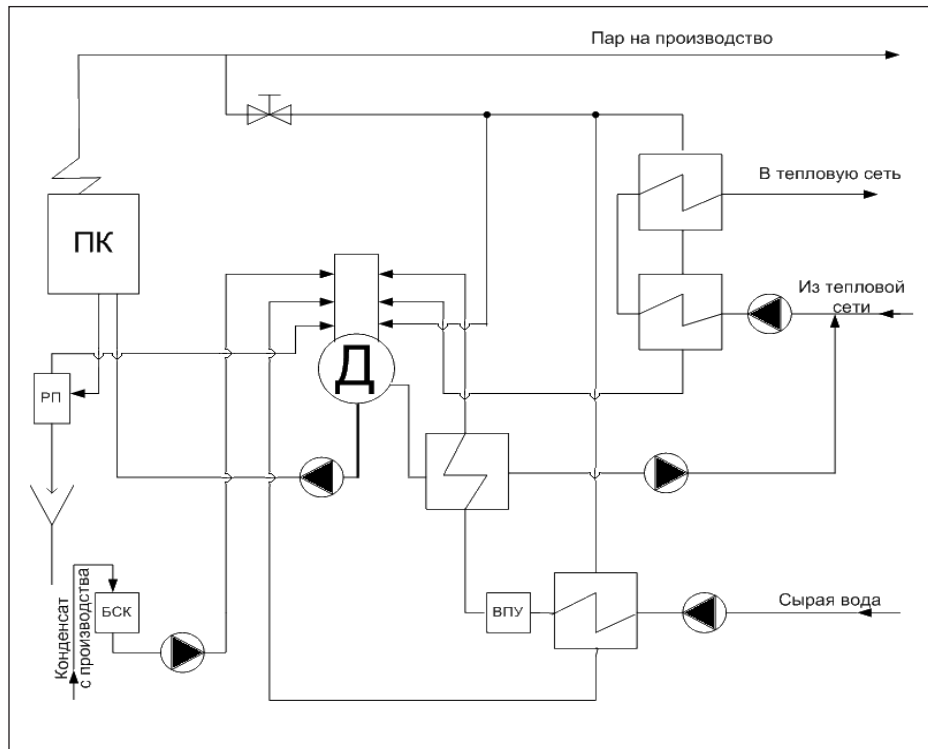


Рис. 1. Теплова схема котельної

ності й падіння тиску в робочому пароводяному просторі.

До системи здійснюється притока маси й енергії з потоком живильної води (регулюючий вплив) і притока енергії від газів до стінки екранних труб, фєстону і котельного пучка (збурюючий вплив).

До основного впливу, що обурює, належить стік маси й енергії з потоком відведеної з барабана насиченої пари, а також зміна величини безперервної продувки. Завдяки програмному управлінню система автоматично відстежує всі параметри поточних процесів, що реалізуються водогрійними і паровими котлами, й управляє технологічним обладнанням, забезпечуючи нормальне і безаварійне функціонування котельної установки. Крім того, система контролює справність обладнання і під час виникнення поломок і аварійних ситуацій сигналізує про це обслуговуючому персоналу. Об'єктом проектування є автоматизована система управління технологічними процесами живлення парового котла ГМ-50. Підтримання заданого рівня води в барабані є однією з найважливіших умов забезпечення надійної роботи обладнання. Актуальність полягає в тому, що підвищення рівня, від нормального збільшує вологість пари, а іноді призводить до закиду води в пароперегрівник і турбіну. А занадто низький рівень («пуск» води з барабана котла) може

привести до порушення циркуляції в окремих екранних трубах котла і їх перепалення. Під час проектування значний час витрачається на вибір елементів, що забезпечують задані параметри, і на перевірку роботи за допустимих відхилень. Наближені методики проектування за нормативами засновані на виборі елементів із заданої номенклатури [4, с. 152].

Автоматизація необхідна для ведення і регулювання процесів експлуатації котла із задіянням мінімальної кількості обслуговуючого персоналу.

На рисунку 1 зображено теплову схему котельні, де ПК – паровий котел ГМ-50, ВПУ – водопідготовка установка, Д – деаератор, БСК – бак збору конденсату, РП – розширювач безперервного продування.

Математичну модель досліджуваного об'єкта утворюють рівняння матеріального й енергетичного балансу робочого середовища (пари і пароводяної суміші) і статичні залежності зв'язку змінних параметрів.

Для отримання моделі об'єкта його розбили на ділянки по каналах «витрата живильної води – рівень», «витрата пари – рівень», а також «температура живильної води – рівень» і «теплосприйняття екранів – рівень» [1, с. 50].

Таким чином, передавальні функції об'єкта матимуть вигляд:

– по каналу «Витрата живильної води – рівень»

$$W(S) = \frac{1}{S} \cdot \frac{-875 \cdot S + 1900}{13100 \cdot S + 9180} \quad (1)$$

– по каналу «Витрата пари – рівень»

$$W(S) = -\frac{1}{S} \cdot \frac{151000 \cdot S - 3940}{13100 \cdot S + 9180} \quad (2)$$

– по каналу «Температура живильної води – рівень»

$$W(S) = \frac{1}{S} \cdot \frac{0.132 \cdot S + 0.531}{13100 \cdot S + 9180} \quad (3)$$

– по каналу «Теплосприйняття екранів – рівень»

$$W(S) = \frac{1}{S} \cdot \frac{0.0021 \cdot S + 0.000862}{13100 \cdot S + 9180} \quad (4)$$

$$\Delta G_D = 6.11 \text{ кг/с} \quad \Delta G_{\text{пв}} = 6.72 \text{ кг/с}$$

$$\Delta \theta_{\text{пв}} = 21.5 \text{ }^\circ\text{C} \quad \Delta Q = 16521.9 \text{ кДж/с}$$

Статичні характеристики об'єкта при зміні рівня у барабані котла під дією обурень:

1) по каналу «Витрата живильної води – рівень»

$\Delta I, mA$

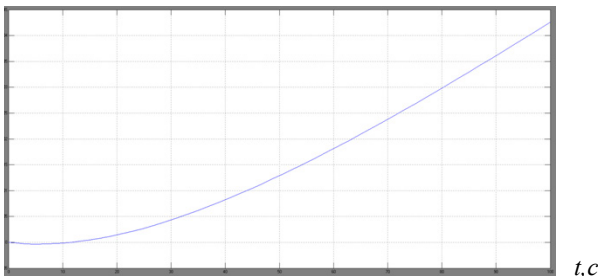


Рис. 2. Статична характеристика по каналу «Витрата живильної води – рівень»

2) по каналу «Витрата пари – рівень»

$\Delta I, mA$

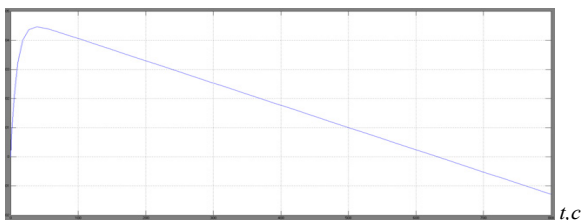


Рис. 3. Статична характеристика по каналу «Витрата пари – рівень»

3) по каналу «Температура живильної води – рівень»

$\Delta I, mA$

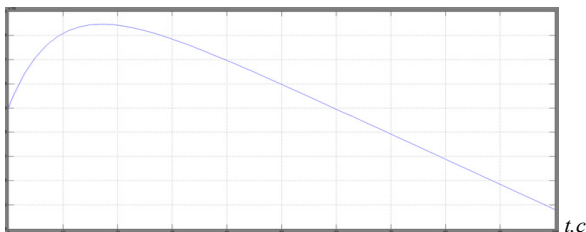


Рис. 4. Статична характеристика по каналу «Температура живильної води – рівень»

4) по каналу «Теплосприйняття екранів – рівень»

$\Delta I, mA$

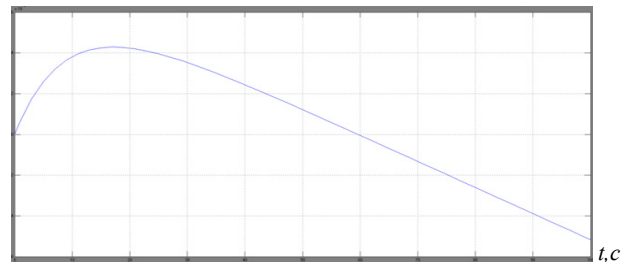


Рис. 5. Статична характеристика по каналу «Теплосприйняття екранів – рівень»

Для нормальної роботи «класичної» трьохімпульсної АСР необхідно, щоб в усталеному режимі сигнали датчиків з витрати пари і води були однаковими за величиною. Якщо ця умова не виконується, то рівень у барабані підтримується зі статичною помилкою. Зазначена особливість є основною перешкодою для використання трьохімпульсної схеми в широкому діапазоні режимів роботи парогенератора. Ця особливість зумовлює низку недоліків цієї схеми: схема дуже чутлива до змін витрат пара і води, що не враховуються датчиками; при зниженому тиску з'являються статичні помилки, викликані зміною щільності перегрітої пари і живильної води (це ускладнює використання схеми під час роботи котлів на змінних параметрах); потрібна особлива ретельність під час поєднання характеристик з витрати пари і води в процесі настройки регулятора.

У результаті багаторічної експлуатації та теоретичних досліджень розроблено схеми, в яких для усунення статичної помилки в канал сигналу по рівню додатково вводиться пропорційно-інтегральний регулятор.

Матеріальний баланс підтримується регулятором витрати, на вхід якого надходять сигнали: командний – з навантаження парогенератора, зворотного зв'язку – з витрати живильної води і коригувальний від ПІ-регулятора рівня. За будь-якого відхилення рівня в барабані від заданого значення вихідний сигнал ПІ-регулятора безперервно змінюється до тих пір, поки нормальне положення не буде відновлено. Отже, в сталому режимі рівень завжди підтримується в суворій відповідності із завданням, а нерівність сигналів витрати компенсується регулятором [3, с. 200].

У всіх барабанних котлах середньої потужності, використовується класична 3-х імпульсна схема регулювання. Однак під час моделювання перехідних процесів у трьохімпульсній АСР рівня з використанням аналітичної моделі барабанного котла

необхідно враховувати структурні особливості моделі барабана котла по рівню. Тому нижче наводиться розрахунок настроювальних параметрів регулятора 3-х імпульсної АСР рівня для подальшого порівняння результатів її роботи в перехідних режимах з запропонованої принципово нової АСР з корегуючим ПІ-регулятором рівня для випадку моделювання перехідних процесів на ЕОМ.

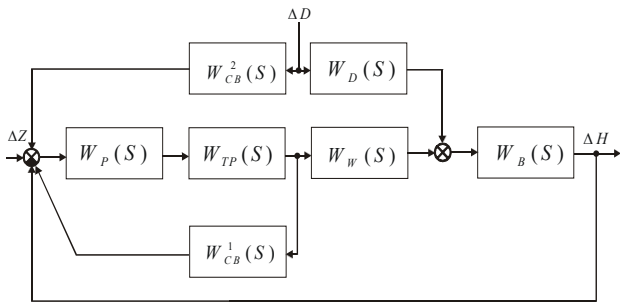


Рис. 6. Структурна схема трьохімпульсної АСР рівня

Структурна схема трьохімпульсної АСР представлена на рисунку 6.  $W_{CB}^2 = k_{CB}^2$ ,  $W_{CB}^1 = k_{CB}^1$  – передавальні функції пристроїв зв’язку по збуренню витратою пара і зміни витрати живильної води відповідно (на практиці це коефіцієнти передавання датчиків витрати живильної води і пари);

$W_{TP}(S) = \frac{k_{PO}}{T_{TP}S + 1}$  – передавальна функція ділянки живильної лінії між регулюючим органом і точкою відбору імпульсу до витратоміра  $k_{PO}$  – коефіцієнт передавання регулюючого органу ( $k\epsilon / c$ ) · % ;

$W_p(S) = \frac{k_p(T_H S + 1)}{T_H S}$  – передавальна функція ПІ-регулятора. (5)

Завданням розрахунку АСР є визначення налаштувань регулятора і необхідних значень коефі-

цієнтів передавання пристроїв зв’язку. Для цього за відомою передавальною функцією регульованого апарату  $W_p(S)$  визначається передавальна функція наведеного об’єкта  $W_{OB}^*(S) = W_{\Delta G_{ПВ} \rightarrow \Delta H}(S) \cdot W_{ЗАП}(S)$ , де  $W_{ЗАП} = e^{-\tau S}$  – транспортне запізнювання регульованої ділянки, яке спостерігається в реальних (експериментальних) кривих розгону за вказаним каналом і може бути пояснено похибкою (нечутливістю) датчика-рівнеміра і можливими люфтами в кінематичній схемі виконавчого механізму. За однією з методик вибору налаштувань регуляторів визначається коефіцієнт передавання умовного ПІ-регулятора  $\mu_m^*$  з умови забезпечення гранично-аперіодичного перехідного процесу. Визначається передавальна функція об’єкта внутрішнього малоінерційного контуру  $W_{OB}(S) = W_{TP}(S) \cdot W_{CB}^1(S)$ , за якою знаходяться налаштування регулятора внутрішнього контуру за умови забезпечення аперіодичності перехідного процесу стабілізації витрати живильної води.

Для виключення статичної помилки в трьохімпульсній АСР необхідно уточнити значення коефіцієнта пристрою зв’язку з обурення витрати пари. Передавальна функція системи регулювання по каналу «витрата пара – рівень» має вигляд:

$$W_{з.с.}(S) = \frac{W_a(S)W_w(S)W_{TP}(S)W_p(S)W_{CB}^2(S) + W_a(S)W_D(S)W_{TP}(S)W_p(S)W_{CB}^2(S) + W_b(S)W_D(S)}{1 + W_{TP}(S)W_p(S)W_{CB}^2(S) + W_a(S)W_w(S)W_{TP}(S)W_p(S)} \quad (6)$$

Розраховані математичні моделі необхідно реалізувати в середовищі Simulink, що дозволить наочно простежити зміну перехідного процесу з урахуванням налаштувань регулятора. Для пояснення процесу необхідні перехідні процеси зміни положення РК і перехідні процеси зміни рівня у барабані котла ГМ-50. Математична модель регулювання рівнем води у барабані котла представлена на рисунку 7.

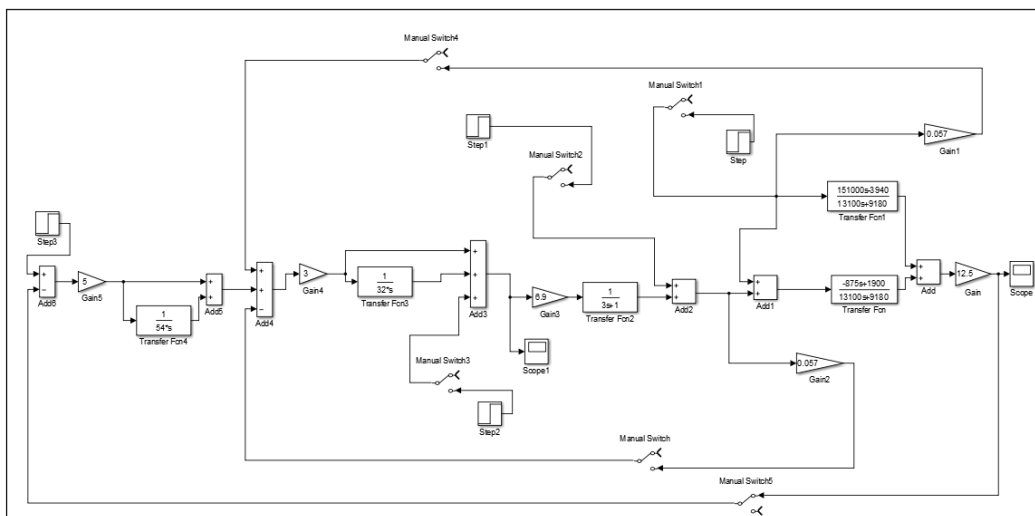


Рис. 7. Математична модель регулювання рівнем води у барабані котла в середовищі Simulink

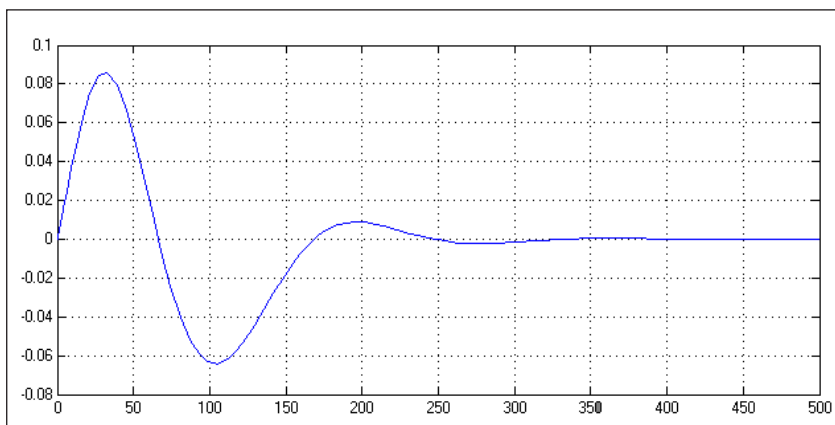


Рис. 8. Перехідний процес регулювання рівня у барабані котла при збуренні по живильній воді

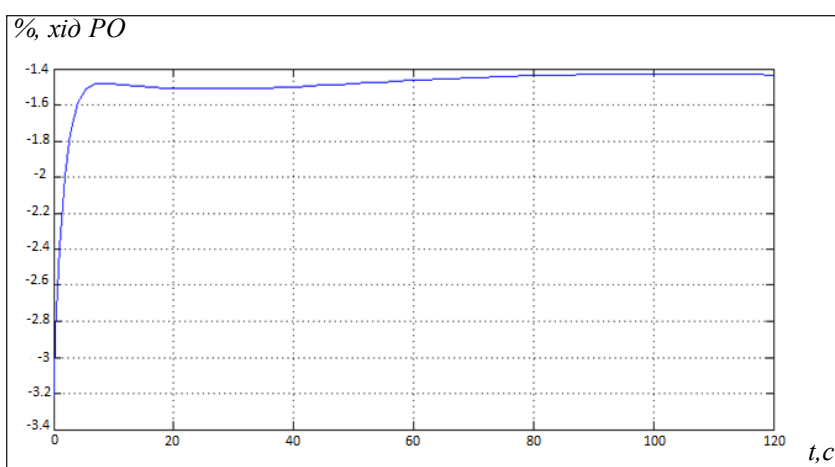


Рис. 9. Зміна положення PO при збуренні по живильній воді

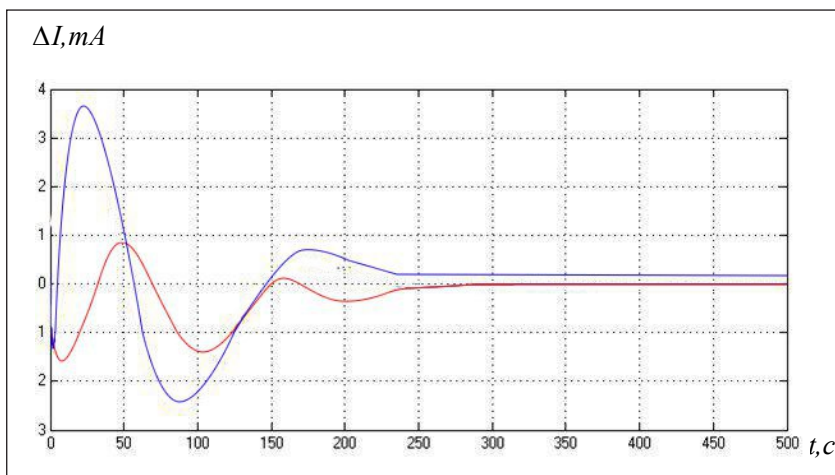


Рис. 10. Перехідний процес регулювання рівня у барабані котла при збуренні по парі

Перехідний процес регулювання рівня у барабані котла при збуренні по живильній воді представлений на рисунку 8.

Зміна положення PO при збуренні по живильній воді представлена на рисунку 9.

Перехідний процес регулювання рівня у барабані котла при збуренні по парі представлений на рисунку 10.

Зміна положення PO при збуренні по парі представлена на рисунку 11.

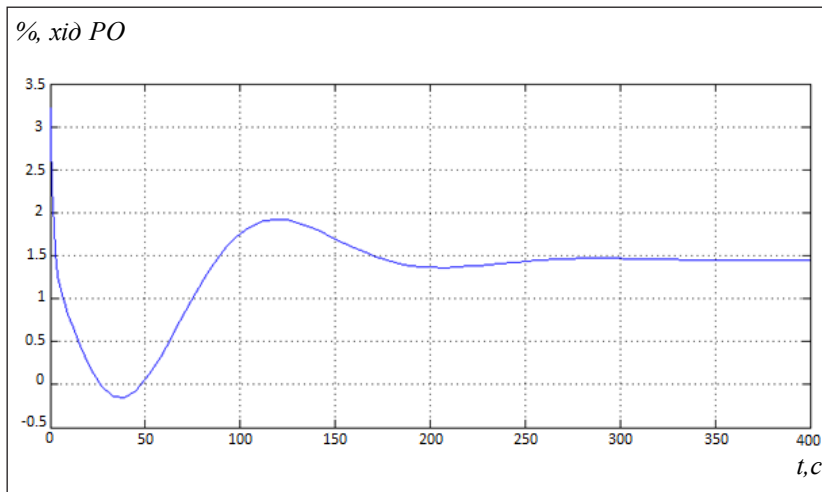


Рис. 11. Зміна положення РО при збуренні по перегрітій парі

За перехідними процесами видно, що регулювання рівня пароводяної суміші в парогенераторі є складним і інерційним процесом. На рисунках 8 і 10 видно, що статична помилка має більше значення при збуренні по каналу перегрітій пари.

Каскадна 3-х імпульсна АСР з коригувальним ІІ регулятором за рівнем демонструє більш якісне регулювання ніж 3-х імпульсна АСР без нього [5, с. 70].

**Висновки.** Для визначення динамічних характеристик котла отримала подальший розвиток

математична модель, заснована на вирішенні рівнянь збереження маси, енергії та об'єму. Було проведено лінеаризацію системи нелінійних рівнянь. Така модель дозволяє визначити кількісний склад умовної формули динаміки котла. У результаті проведеного аналізу впливу зовнішніх збурень визначено криві розгону збурюючими каналами. Для забезпечення якісної підтримки рівня води в котлі.

Розроблене математичний опис може бути використано для подальшого синтезу системи автоматичного регулювання.

#### Список літератури:

1. Демченко В.А. Автоматизация и моделирование технологических процессов АЭС и ТЭС. Одесса «Астропринт», 2001. 50 с.
2. Артюх С.Ф., Дуэль М.А., Шелепов И.Г. Основы автоматизированных систем управления энергогенерирующими установками электростанций. Харьков, 1998. 324 с.
3. Тошинський В.І., Бабіченко А.К., Молчанов В.І. Технічні засоби автоматизації. Частина 2. Мікропроцесорні регулювальні та виконавчі пристрої: Навчальний посібник / за ред. А.К. Бабіченка. Київ, 1977. С. 200.
4. Александров В.Г. Паровые котлы средне и малой мощности. Москва, 1972. С. 151–170.
5. Кулаков Г.Т., Кухоренко А.Н., Голинко И.М. Инвариантная система автоматического регулирования. Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2015. С. 70–71.

#### АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ ПИТАНИЯ ПАРОВОГО КОТЛА ГМ-50

*Внедрение систем автоматизированного управления паровыми и водогрейными котлами, построенных на основе программируемых контроллеров, позволяет автоматизировать процесс производства тепловой энергии в котлах и значительно упростить контроль и управление этим процессом. Применение такой системы повышает эффективность функционирования котлоагрегата за счет снижения потребления энергоресурсов, рационального сжигания топлива, использования технологического оборудования, оперативного управления оборудованием и технологическим процессом. Объектом проектирования является автоматизированная система управления технологическими процессами питания парового котла ГМ-50.*

*Поддержание заданного уровня воды в барабане является одним из важнейших условий обеспечения надежной работы оборудования. Актуальность заключается в том, что повышение уровня, от нормального увеличивает влажность пара, а иногда приводит к забросу воды в пароперегреватель и турбину.*

**Ключевые слова:** автоматическая система регулирования, паровой котёл, автоматизация, математическая модель, передаточная функция.

**SYSTEM OF AUTOMATIC CONTROL OF TECHNOLOGICAL PROCESSES  
OF POWER STEAM BOILER GM-50**

*Introduction of automated control systems for steam and water heating boilers, built on the basis of programmable controllers, allows automation of the process of heat energy production in boilers and greatly simplify control and management of this process. The application of system improves the efficiency of the operation of the boiler unit by reducing energy consumption, rational combustion of fuel, the use of process equipment, operational control of equipment and process. The object of the design is an automated control system for the technological processes of supplying the steam boiler GM-50.*

*Maintaining a water level in the boiler drum is one of the most important conditions for ensuring reliable equipment operation. The urgency is that raising the level from the normal increases the wetness of the vapor, and sometimes leads to the flooding of the water in the steam superheater and the turbine.*

**Key words:** *automation control system, steam boiler, automation, mathematical model, transfer function.*

УДК 681.151

**Саць Е.Ф.**

Одесский национальный политехнический университет

**Саць Т.А.**

Одесский национальный политехнический университет

**Максимов М.В.**

Одесский национальный политехнический университет

## СОПОСТАВЛЕНИЕ ПОСТОЯННЫХ РЕГУЛИРОВАНИЯ В РЕГУЛЯТОРЕ МОЩНОСТИ РЕАКТОРА ПРИ ПРОГРАММЕ РЕГУЛИРОВАНИЯ С ПОСТОЯННОЙ СРЕДНЕЙ ТЕМПЕРАТУРОЙ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В ПЕРВОМ КОНТУРЕ И ПОСТОЯННОЙ ТЕМПЕРАТУРОЙ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ НА ВХОДЕ В АКЗ РЕАКТОРА ПО АКСИАЛЬНОМУ ОФСЕТУ

*В статье рассмотрено две программы регулирования мощности реактора, а именно, постоянная средней температуры и постоянная входа реактора. Предоставлены принципиальные схемы программ регулирования. Разработаны усовершенствованные схемы регулирования. Разработана имитационная модель реактора ВВЭР-1000. Произведено сопоставление двух программ регулирования по аксиальному офсету при 48 часах работы реактора в режиме маневрирования мощностью со 100% до 85%.*

**Ключевые слова:** программы регулирования, мощность реактора, ВВЭР-1000, система автоматического регулирования, имитационная модель, аксиальный офсет.

**Постановка проблемы.** Периодическое перераспределение энерговыделения по высоте АКЗ реактора под действием ксеноновых колебаний является одной из основных проблем обеспечения безопасной эксплуатации и устойчивости АКЗ реактора энергоблока с ВВЭР-1000 в существующих стационарных АСР. В связи с этим главной задачей для обеспечения устойчивости реактора ВВЭР-1000 в маневренном режиме является поддержание стабильного поведения поля энерговыделения либо его аксиального офсета.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Авторами (Т.В. Фощ, М.В. Максимов, М.В. Никольский) была написана статья на тему «Анализ влияния методов управления мощностью энергоблока с водо-водяным реактором на аксиальный офсет». Статья посвящена анализу влияния методов управления мощностью энергоблока с ВВЭР-1000 в маневренном режиме на количественную меру устойчивости, а именно на величину аксиального офсета. Были описаны автоматизированные системы регулирования мощностью энергоблока с реактором ВВЭР-1000 для эксплуатации в маневренном режиме, а также смоделированы и приведены графики изменения аксиального офсета реактора [1].

**Постановка задания.** Сравнить две программы регулирования реактора ВВЭР-1000 по аксиальному офсету и выбрать наиболее лучшую программу для высокой надежности и безопасности энергоблока, которые зависят от устойчивости реактора при переходе с одного уровня мощности на другой.

**Изложение основного материала исследования.** В работе рассматривается аксиальный офсет, две программы регулирования энергоблока ВВЭР-1000, в частности программа регулирования с постоянной средней температурой и с постоянной температурой входа в реактор.

Изменение распределения энерговыделения в аксиальном, радиальном и азимутальном направлениях может быть вызвано ксеноновыми колебаниями. Аксиальные колебания описываются с помощью аксиального офсета – АО, радиальные и азимутальные колебания – с помощью величины относительной мощности энерговыделения в *i*-ой ячейке АКЗ. АО определяют как:

$$AO = \frac{Q_1 - Q_2}{Q} \quad (1)$$

где  $Q_1, Q_2$  – мощность нижней и верхней половин АКЗ,  $Q = Q_1 + Q_2$ .

Отклонение данной величины от ее равновесного значения, соответствующего равновесному

распределению  $^{135}\text{Xe}$ , могут быть представлены в виде:

$$A(t) = A(t_0)\exp(\alpha t)\cos(\nu t), \quad (2)$$

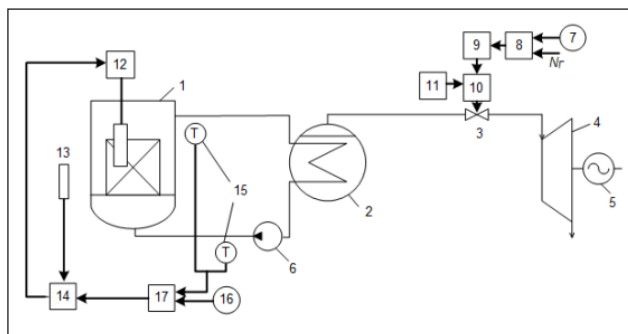
Где  $\nu = \pi/2T$ ,  $T$  – период свободных ксеноновых колебаний,  $\tau = t - t_0$ ,  $t_0$  – момент достижения первого экстремума.

После фиксации экстремумов  $A_0, A_i, \tau_i$  в соответствующие моменты времени  $t_0, t_i, \tau_i$  и считая, что при достижении экстремума  $|\cos(\nu t)| = 1$ , можно получить:

$$\alpha_i = \frac{1}{\tau_i} \ln \left| \frac{A_i}{A_0} \right|, \tau_i = t_{i-1} - t_0, T_i = 2(t_{i-1} - t_i), \quad (3)$$

Для получения индекса стабильности  $\alpha$  и периода свободных колебаний  $T$ , усредняют величины  $\alpha_i$  и  $T_i$ , где если  $\alpha < 0$ , то реактор устойчив (колебания затухают), а при  $\alpha \geq 0$  – реактор неустойчив (колебания не затухают). Маневрирование мощностью энергоблока происходит по статическим программам регулирования. Такие программы показывают зависимость технологических параметров энергоблока от мощности в установившихся режимах. Далее будет рассматриваться, как изменятся технологические параметры и АО в известных статических программах регулирования в маневренном режиме.

На рис. 1 показана схема регулирования мощности энергоблока, реализующая программу регулирования с постоянной средней температурой теплоносителя в АКЗ реактора [2].

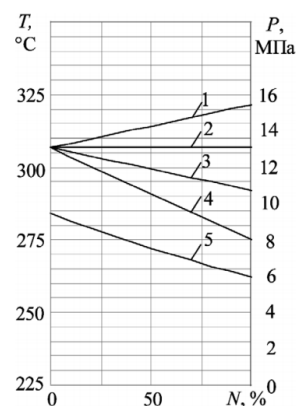


**Рис. 1. Принципиальная схема регулирования энергоблоков с реактором ВВЭР-1000, реализующая программу регулирования с постоянной средней температурой теплоносителя в АКЗ реактора**

На рис. 2 изображены: 1 – реактор; 2 – парогенератор; 3 – регулирующие клапаны турбины; 4 – турбина; 5 – генератор; 6 – главный циркуляционный насос; 7 – датчик электрической мощности генератора; 8 – регулятор мощности энергоблока; 9 – механизм управления турбиной; 10 – сервомотор; 11 – регулятор частоты вращения турбины; 12 – приводы регулирующих стержней; 13 – ионизационная камера; 14 – регулятор нейтронной мощно-

сти реактора; 15 – датчики температуры теплоносителя первого контура; 16 – задатчик средней температуры теплоносителя первого контура; 17 – регулятор средней температуры теплоносителя первого контура.

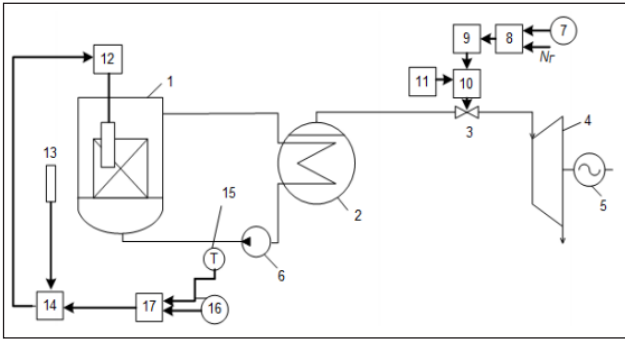
Программа регулирования с постоянной средней температурой теплоносителя в первом контуре ( $T_{SR} = \text{const}$ ). В этой программе регулирования (рис. 2) при переходе с одного уровня мощности на другой ТЭР и МЭР возникают в верхней и нижней половинах реактора, что связано с изменением  $t_{vX}$  и  $t_{vUX}$ . При снижении уровня мощности  $t_{vUX}$  уменьшается, поэтому ТЭР в верхней половине реактора будет иметь положительный знак, а  $t_{vX}$  увеличивается, и ТЭР в нижней половине реактора будет иметь отрицательный знак. Так как мощность снижается, МЭР будет иметь положительный знак. Следовательно, произойдет неодинаковое изменение энерговыделения по высоте АКЗ реактора, которое будет усилено при возвращении прежнего уровня мощности, что приведет к возникновению ксеноновых колебаний. Так как все ОР СУЗ имеют одинаковую эффективность, их воздействие на энерговыделение в верхней половине реактора не сможет ликвидировать ксеноновые колебания – одновременно невозможно воздействовать ОР СУЗ на нижнюю часть реактора без воздействия на верхнюю из-за конструктивных особенностей. Таким образом, существенным недостатком этой программы регулирования являются неустойчивость и неуправляемость аксиальным офсетом, а следовательно, и нахождение реактора в неустойчивом состоянии во время и после изменения уровня мощности.



**Рис. 2. Характеристика энергоблока ВВЭР 1000 при постоянной средней температуре:**

- 1 – температура теплоносителя на выходе из АКЗ,  $t_{vUX}$  ;
- 2 – средняя температура теплоносителя в АКЗ,  $t_{SR}$  ;
- 3 – температура теплоносителя на входе в АКЗ,  $t_{vX}$  ;
- 4 – температура насыщенного пара во втором контуре,  $t_s$  ;
- 5 – давление пара во втором контуре,  $P_{II}$



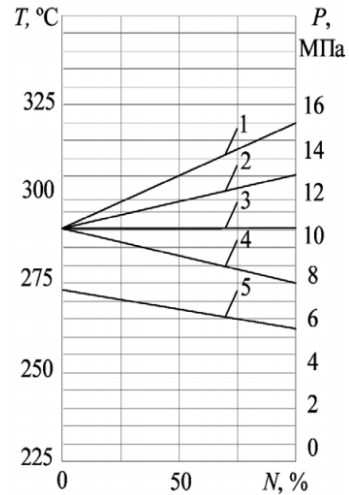


**Рис. 3. Принципіальна схема АСР потужністю енергоблоку з реактором ВВЕР-1000, функціонуюча по програмі регулювання з постійною температурою теплоносія на вході в АКЗ реактора**

На рис. 5 зображені: 1 – реактор; 2 – парогенератор; 3 – регулюючі клапани турбіни; 4 – турбіна; 5 – генератор; 6 – головний циркуляційний насос; 7 – датчик електричної потужності генератора; 8 – регулятор потужності енергоблоку; 9 – механізм управління турбиною; 10 – сервомотор; 11 – регулятор частоти вращения турбіни; 12 – приводи регулюючих стержней; 13 – іонізаційна камера; 14 – регулятор нейтронної потужності реактора; 15 – датчик температури теплоносія на вході в АКЗ реактора; 16 – датчик температури теплоносія на вході в АКЗ реактора; 17 – регулятор температури теплоносія на вході в АКЗ реактора.

Програма регулювання з постійною температурою теплоносія на вході в АКЗ реактора ( $t_{vx} = const$ ). В цій програмі регулювання при переході з одного рівня потужності на другий температурний і потужний ефекти реактивності виникають тільки в верхній половині реактора. Це пов'язано з зміною середньої температури теплоносія ( $t_{SR}$ ), температури теплоносія на виході ( $t_{vux}$ ) і постійністю температури теплоносія на вході в АКЗ реактора. Причому при зменшенні потужності значення  $t_{vux}$  і  $t_{SR}$  зменшуються (рис. 4), температурний і потужний ефект реактивності буде мати позитивний знак. Таким образом, енерговиділення верхньої половини реактора буде більше нижньої половини. Таке зміння енерговиділення легко компенсується зміною положення регулюючої групи ОР СУЗ. К достоїнствам цієї програми регулювання можна віднести те, що з-за підтримки постійного значення  $t_{vx}$  в нижній половині АКЗ реактора відсутнє зміння температурного ефекта реактивності, а значить, нижня половина АКЗ залишається

устойчивой на всем протяжении маневра мощностью, возникновение ксеноновых колебаний, вызванное изменением тепловой эффективности реактивности отсутствует, изменение энерговыделения в верхней половине АКЗ реактора компенсируются регулирующей группой ОР СУЗ, а следовательно, обеспечиваются постоянство и управляемость аксиальным офсетом и устойчивое состояние реактора.



**Рис. 4. Характеристика енергоблоку ВВЕР 1000 при постійній температурі теплоносія на вході в АКЗ реактора:**

- 1 – температура теплоносія на виході з АКЗ,  $t_{vux}$  ;
- 2 – середня температура теплоносія в АКЗ,  $t_{SR}$  ;
- 3 – температура теплоносія на вході в АКЗ,  $t_{vx}$  ;
- 4 – температура насиченого пара во второму контурі,  $t_s$  ;
- 5 – тиск пара во второму контурі,  $p_1$

В пакеті Simulink, в середі Matlab, була розроблена імітаційна модель роботи реактора ВВЕР-1000 з навантаженням 85%.

В ході роботи, були розроблені удосконалені принципіальні схеми для реалізації програми регулювання з постійною середньою температурою теплоносія в АКЗ реактора і з постійною температурою теплоносія на вході в АКЗ реактора.

При моделюванні удосконалених принципіальних схем АСР були отримані наступні графіки зміння АО в режимі маневру потужністю со 100% до 85% за 48 годин роботи реактора.

Ісходя з отриманих результатів, можна зробити висновок, що аксіальний офсет за 48 годин роботи реактора в режимі маневрування потужністю со 100% до 85% і назад на всьому проміжку часу зміння в незначительному діапазоні.

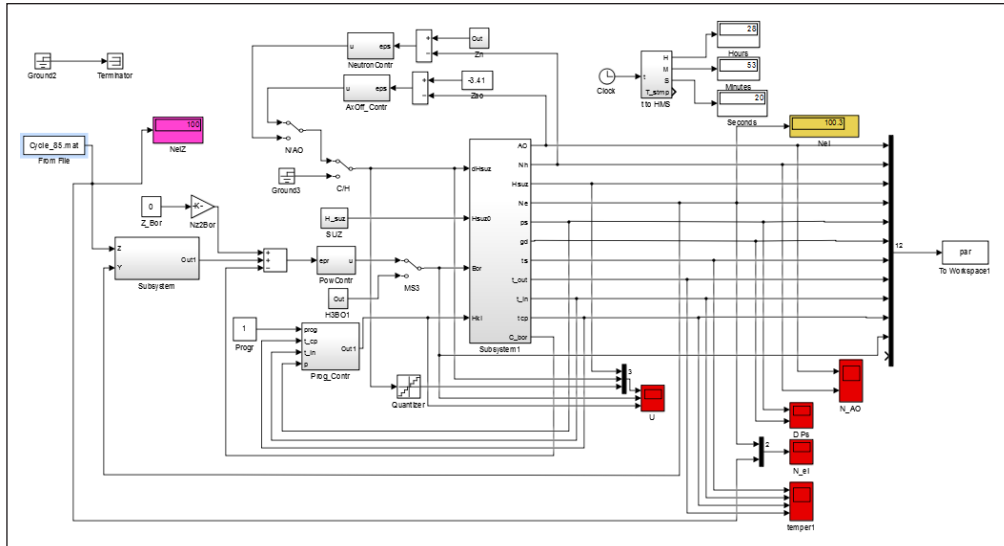


Рис. 5. Имитационная модель реактора ВВЭР-1000

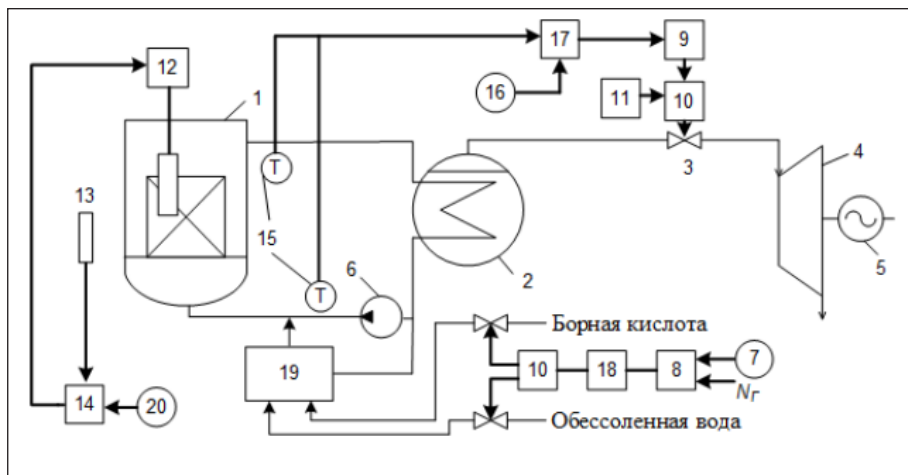


Рис. 6. Усовершенствованная принципиальная схема регулирования энергоблока с реактором ВВЭР-1000, реализующая программу регулирования с постоянной средней температурой теплоносителя в АКЗ реактора

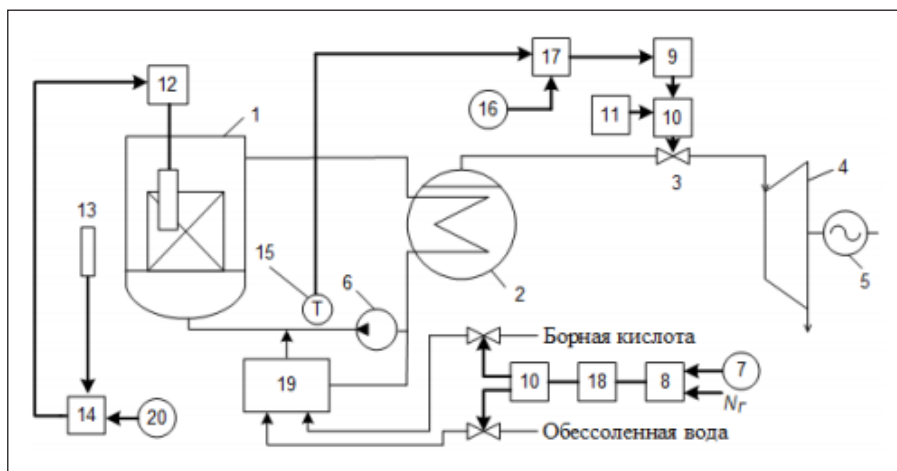


Рис. 7. Усовершенствованная принципиальная схема АСР мощностью энергоблока с реактором ВВЭР-1000, функционирующая по программе регулирования с постоянной температурой теплоносителя на входе в АКЗ реактора

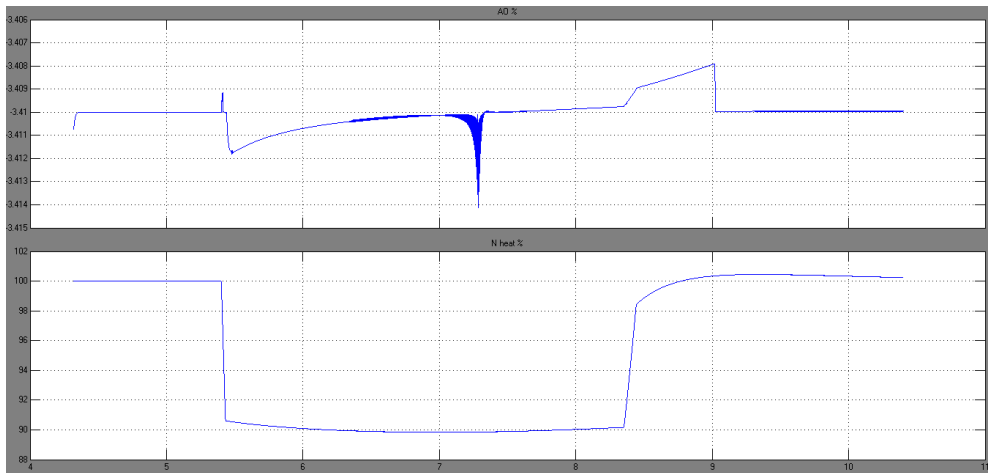


Рис. 8. График изменения АО за 48 часов работы реактора, функционирующий по усовершенствованной программе регулирования с постоянной средней температурой теплоносителя в 1-ом контуре

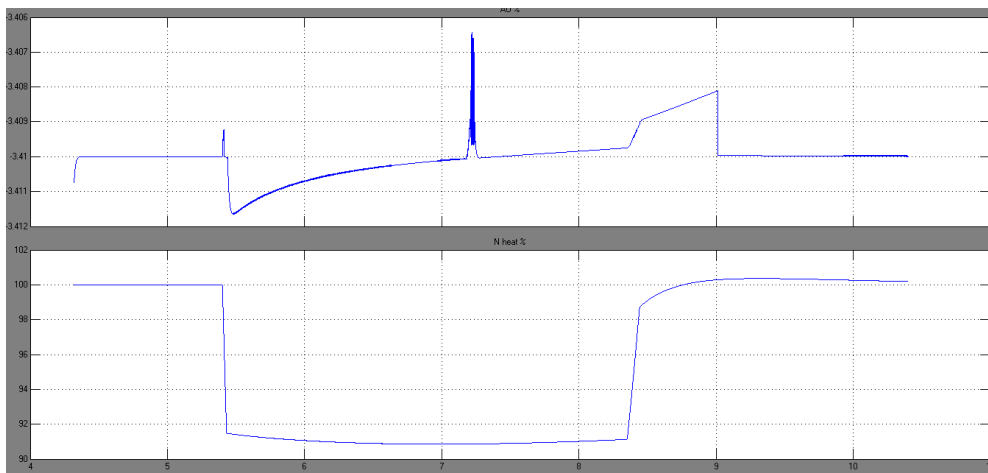


Рис. 9. График изменения АО за 48 часов работы реактора, функционирующий по усовершенствованной программе регулирования с постоянной температурой теплоносителя на входе в АКЗ реактора

**Выводы.** В ходе сопоставления двух программ регулирования (программа регулирования с постоянной средней температурой теплоносителя в первом контуре и постоянной температурой теплоносителя на входе в АКЗ реактора) по аксиальному офсету было определено, что за 48

часов работы реактора в режиме маневрирования мощностью со 100% до 85% и обратно на всем промежутке времени изменяется в незначительном диапазоне. Данные программы регулирования имеют право быть использованы на АЭС с реактором ВВЭР-1000.

#### Список литературы:

1. Фощ Т.В., Максимов М.В., Никольский М.В. Анализ влияния методов управления мощностью энергоблока с водо-водяным реактором на аксиальный офсет. Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2014. № 2. С. 19–27.
2. Иванов В.А. Эксплуатация АЭС: Учебник для вузов, Санкт-Петербург, 1994. 384 с.
3. Демченко В.А. Автоматизация и моделирование технологических процессов АЭС и ТЭС, Одесса, 2001. 308 с.
4. Пельх С.Н. Способ стабилизации аксиального распределения нейтронного поля при маневрировании мощностью ВВЭР-1000. Ядерная и радиационная безопасность. 2011. № 1. С. 27–32.

**ПОРІВНЯННЯ ПОСТІЙНИХ РЕГУЛЮВАННЯ В РЕГУЛЯТОРІ ПОТУЖНОСТІ РЕАКТОРА ПРИ ПРОГРАМІ РЕГУЛЮВАННЯ З ПОСТІЙНОЮ СЕРЕДНЬОЮ ТЕМПЕРАТУРОЮ ТЕПЛОНОСІЯ В ПЕРШОМУ КОНТУРІ І ПОСТІЙНОЮ ТЕМПЕРАТУРОЮ ТЕПЛОНОСІЯ НА ВХОДІ В АКЗ РЕАКТОРА, ПО АКСІАЛЬНОМУ ОФСЕТУ**

*У статті розглянуто дві програми реактора, зокрема постійна середньої температури і постійна входу реактора. Представлено принципові схеми регулювання. Розроблено вдосконалені схеми регулювання. Розроблено імітаційну модель реактора ВВЕР-1000. Здійснено порівняння двох програм регулювання по аксіальному офсету при 48 годинах роботи реактора в режимі маневрування потужністю від 100% до 85%*

**Ключові слова:** програми регулювання, потужність реактора, ВВЕР-1000 система автоматичного регулювання, імітаційна модель, аксіальний офсет.

**COMPARISON OF PERMANENT REGULATION IN POWER CONTROL OF THE REACTOR, WHEN THE CONTROL PROGRAM WITH A CONSTANT AVERAGE COOLANT TEMPERATURE IN PRIMARY CIRCUIT AND CONSTANT TEMPERATURE OF THE COOLANT AT THE ENTRANCE TO THE ANTICORROSION REACTOR FOR AXIAL OFFSET**

*The article considers two programs of reactor power control, namely, the constant of average temperature and the constant of reactor inlet. The basic schemes of control programs are presented. Improved control schemes have been developed. A simulation model of the WWER-1000 reactor is developed. The comparison of two programs of regulation on axial offset, at 48 hours of operation of the reactor in the mode of maneuvering with power from 100% to 85% is made.*

**Key words:** control programs, reactor power, WWER-1000, automatic control system, simulation model, axial offset.

УДК 681.151

**Саць Т.А.**

Одесский национальный политехнический университет

**Саць Е.Ф.**

Одесский национальный политехнический университет

## СОПОСТАВЛЕНИЕ ПОСТОЯННЫХ РЕГУЛИРОВАНИЯ В РЕГУЛЯТОРЕ МОЩНОСТИ РЕАКТОРА ПРИ ПРОГРАММЕ РЕГУЛИРОВАНИЯ С ПОСТОЯННЫМ ДАВЛЕНИЕМ ВО ВТОРОМ КОНТУРЕ И ПОСТОЯННОЙ ТЕМПЕРАТУРОЙ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ НА ВХОДЕ В АКЗ РЕАКТОРА ПО АКСИАЛЬНОМУ ОФСЕТУ

*В статье рассмотрено две программы регулирования мощности реактора, в частности программу с постоянным давлением во втором контуре и постоянную температуры входа в реактор. Приведены принципиальные схемы программ регулирования. Разработаны усовершенствованные схемы регулирования. Разработана имитационная модель реактора ВВЭР-1000. Произведено сопоставление двух программ регулирования по аксиальному офсету при 36 часах работы реактора в режиме маневрирования со 100% до 80%.*

**Ключевые слова:** программа регулирования, мощность реактора, ВВЭР-1000, АКЗ, система автоматического регулирования, имитационная модель, аксиальный офсет.

**Постановка проблемы.** Периодическое перераспределение энерговыделения по высоте АКЗ реактора под действием ксеноновых колебаний является одной из основных проблем обеспечения безопасной эксплуатации и устойчивости АКЗ реактора энергоблока с ВВЭР-1000 в существующих стационарных АСР. В связи с этим главной задачей для обеспечения устойчивости реактора ВВЭР-1000 в маневренном режиме является поддержание стабильного поведения поля энерговыделения либо его аксиального офсета.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Авторами Т.В. Фощ, М.В. Максимов, М.В. Никольский, была написана статья на тему: «Анализ влияния методов управления мощностью энергоблока с водо-водяным реактором на аксиальный офсет». Статья посвящена анализу влияния методов управления мощностью энергоблока с ВВЭР-1000 в маневренном режиме на количественную меру устойчивости, а именно на величину аксиального офсета. Были описаны автоматизированные системы регулирования мощностью энергоблока с реактором ВВЭР-1000 для эксплуатации в маневренном режиме, а также смоделированы и приведены графики изменения аксиального офсета реактора [1].

**Постановка задания.** Сравнить две программы регулирования реактора ВВЭР-1000 по аксиальному офсету при маневрировании ректора со 100%

до 80%. Выбрать наиболее лучшую программу для высокой надежности и безопасности энергоблока, которые зависят от устойчивости реактора при переходе с одного уровня мощности на другой.

**Изложение основного материала исследования.** В работе рассматривается вопрос о аксиальном офсете, две программы регулирования реактора ВВЭР-1000 (программа регулирования с постоянным давлением во втором контуре и с постоянной температурой входа в реактор).

Изменение распределения энерговыделения в аксиальном, радиальном и азимутальном направлениях может быть вызвано ксеноновыми колебаниями. Аксиальные колебания описываются с помощью аксиального офсета – АО, радиальные и азимутальные колебания – с помощью величины относительной мощности энерговыделения в  $i$ -ой ячейке АКЗ. АО определяют как:

$$AO = \frac{Q_1 - Q_2}{Q} \quad (1)$$

где  $Q_1, Q_2$  – мощность нижней и верхней половин АКЗ,  $Q = Q_1 + Q_2$ .

Отклонение данной величины от ее равновесного значения, соответствующего равновесному распределению  $^{135}\text{Xe}$ , могут быть представлены в виде:

$$A(t) = A(t_0) \exp(\alpha t) \cos(\nu t), \quad (2)$$

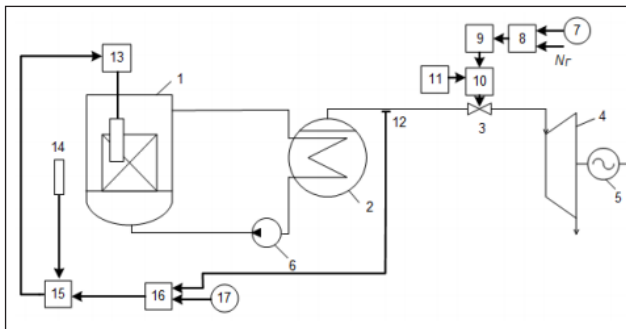
Где  $\nu = \pi/2T$ ,  $T$  – период свободных ксеноновых колебаний,  $\tau = t - t_0$ ,  $t_0$  – момент достижения первого экстремума.

После фиксации экстремумов  $A_0, A_1, \dots, A_i$  в соответствующие моменты времени  $t_0, t_1, \dots, t_i$  и считая, что при достижении экстремума  $|\cos(v\tau)| = 1$ , можно получить:

$$\alpha_i = \frac{1}{\tau_i} \ln \left| \frac{A_i}{A_0} \right|, \tau_i = t_{i-1} - t_0, T_i = 2(t_{i-1} - t_i), \quad (3)$$

Для получения индекса стабильности  $\alpha$  и периода свободных колебаний  $T$ , усредняют величины  $\alpha_i$  и  $T_i$ , где если  $\alpha < 0$ , то реактор устойчив (колебания затухают), а при  $\alpha \geq 0$  – реактор неустойчив (колебания не затухают). Маневрирование мощностью энергоблока происходит по статическим программам регулирования. Такие программы показывают зависимость технологических параметров энергоблока от мощности в установившихся режимах. Далее будет рассматриваться, как изменяются технологические параметры и АО в известных статических программах регулирования в маневренном режиме.

На рис. 1 приведена принципиальная схема регулирования энергоблоков с реактором ВВЭР-1000, реализующая программу регулирования с постоянным давлением во втором контуре  $p_1$  [2].

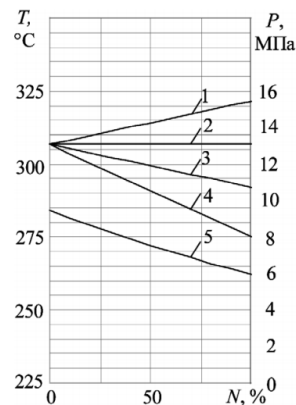


**Рис. 1. Принципиальная схема регулирования энергоблоков с реактором ВВЭР-1000, реализующая программу регулирования с постоянным давлением во втором контуре  $p_1$**

На рис. 3 изображены: 1 – реактор; 2 – парогенератор; 3 – регулирующие клапаны турбины; 4 – турбина; 5 – генератор; 6 – главный циркуляционный насос; 7 – задатчик электрической мощности генератора; 8 – регулятор мощности энергоблока; 9 – механизм управления турбиной; 10 – сервомотор; 11 – регулятор частоты вращения турбины; 12 – первичный измерительный преобразователь давления пара во втором контуре; 13 – приводы регулирующих стержней; 14 – ионизационная камера; 15 – регулятор нейтронной мощности реактора; 16 – регулятор давления пара во втором контуре; 17 – датчик давления пара во втором контуре.

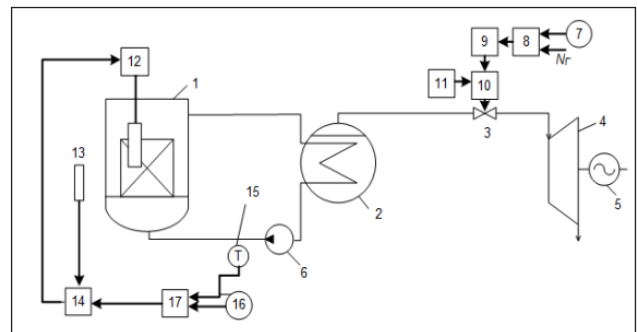
Программа регулирования с постоянным давлением пара второго контура ( $p_1 = const$ ). В этой программе регулирования (см. рис. 2) уменьшаются значения  $t_{vX}$ ,  $t_{SR}$  и  $t_{vUX}$ . Таким образом, ТЭР по

высоте всей АКЗ реактора имеет положительный знак, но в верхней половине реактора этот эффект реактивности проявляется сильнее, чем в нижней, из-за большей разницы изменения температуры теплоносителя. МЭР также имеет положительный знак. Таким образом, энерговыделение в верхней половине реактора будет больше энерговыделения в нижней половине. Для компенсации ТЭР необходимо циклическое воздействие на регулируемую группу ОР СУЗ, что может привести к колебаниям величины АО и последующей возможной потере устойчивости. Кроме того, температурные напряжения в оболочках твэлов повышены из-за большего количества перемещений ОР СУЗ во время проведения маневра мощностью. При эксплуатации энергоблоков с реактором ВВЭР-1000 в основном применяется программа регулирования с  $p_1 = const$ . Это связано с тем, что энергоблоки преимущественно эксплуатируются в базовом режиме.



**Рис. 2. Характеристика энергоблока ВВЭР-1000 при постоянном давлении во втором контуре:**

- 1 – температура теплоносителя на выходе из АКЗ,  $t_{vUX}$ ;
- 2 – средняя температура теплоносителя в АКЗ,  $t_{SR}$ ;
- 3 – температура теплоносителя на входе в АКЗ,  $t_{vX}$ ;
- 4 – температура насыщенного пара во втором контуре,  $t_s$ ;
- 5 – давление пара во втором контуре,  $p_1$



**Рис. 3. Принципиальная схема АСР мощностью энергоблока с реактором ВВЭР-1000, функционирующая по программе регулирования с постоянной температурой теплоносителя на входе в АКЗ реактора**

На рис. 3 изображены: 1 – реактор; 2 – парогенератор; 3 – регулирующие клапаны турбины; 4 – турбина; 5 – генератор; 6 – главный циркуляционный насос; 7 – задатчик электрической мощности генератора; 8 – регулятор мощности энергоблока; 9 – механизм управления турбиной; 10 – сервомотор; 11 – регулятор частоты вращения турбины; 12 – приводы регулирующих стержней; 13 – ионизационная камера; 14 – регулятор нейтронной мощности реактора; 15 – датчик температуры теплоносителя на входе в АКЗ реактора; 16 – датчик температуры теплоносителя на входе в АКЗ реактора; 17 – регулятор температуры теплоносителя на входе в АКЗ реактора [2].

Программа регулирования с постоянной температурой теплоносителя на входе в АКЗ реактора ( $t_{VX} = const$ ). В этой программе регулирования при переходе с одного уровня мощности на другой температурный и мощностной эффекты реактивности возникают только в верхней половине реактора. Это связано с изменением средней температуры теплоносителя ( $t_{SR}$ ), температуры теплоносителя на выходе ( $t_{VUX}$ ) и постоянством температуры теплоносителя на входе в АКЗ реактора. Причем при уменьшении мощности значения  $t_{VUX}$  и  $t_{SR}$  уменьшаются (рис. 4), температурный и мощностной эффект реактивности будет иметь положительный знак. Таким образом, энерговыделение верхней половины реактора будет больше нижней половины. Такое изменение энерговыделения легко компенсируется изменением положения регулирующей группы ОР СУЗ. К достоинствам этой программы регулирования можно отнести то, что из-за поддержания постоянного значения  $t_{VX}$  в нижней половине АКЗ

реактора отсутствует изменение температурного эффекта реактивности, а значит, нижняя половина АКЗ остается устойчивой на всем протяжении маневра мощностью, возникновение ксеноновых колебаний, вызванное изменением тепловой эффективности реактивности отсутствует, изменение энерговыделения в верхней половине АКЗ реактора компенсируются регулирующей группой ОР СУЗ, а следовательно, обеспечиваются постоянство и управляемость аксиальным офсетом и устойчивое состояние реактора.

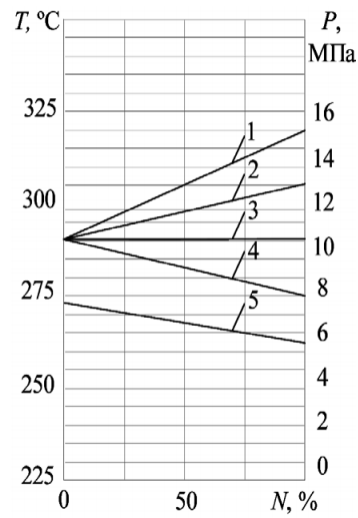


Рис. 4. Характеристика энергоблока ВВЭР 1000 при постоянной температуре теплоносителя на входе в АКЗ реактора:

- 1 – температура теплоносителя на выходе из АКЗ,  $t_{VUX}$  ;
- 2 – средняя температура теплоносителя в АКЗ,  $t_{SR}$  ;
- 3 – температура теплоносителя на входе в АКЗ,  $t_{VX}$  ;
- 4 – температура насыщенного пара во втором контуре,  $t_s$  ;
- 5 – давление пара во втором контуре,  $p_{II}$

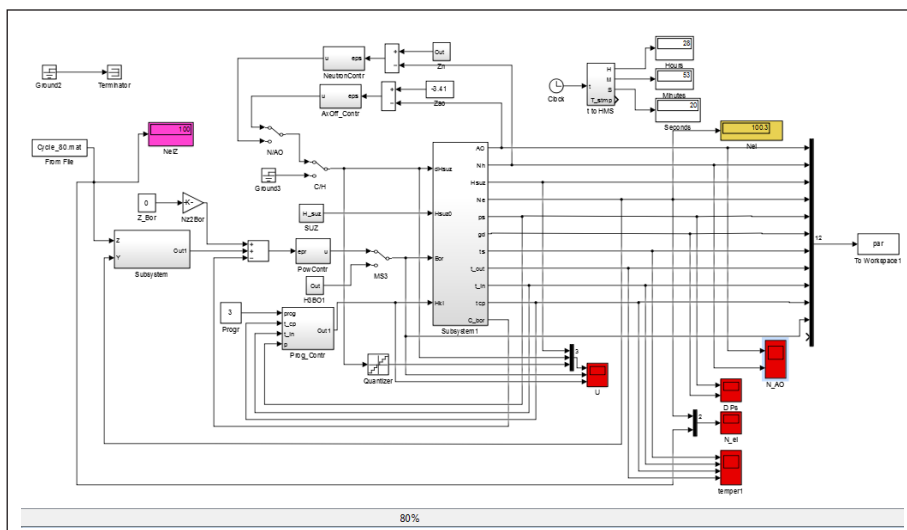


Рис. 5. Имитационная модель реактора ВВЭР-1000

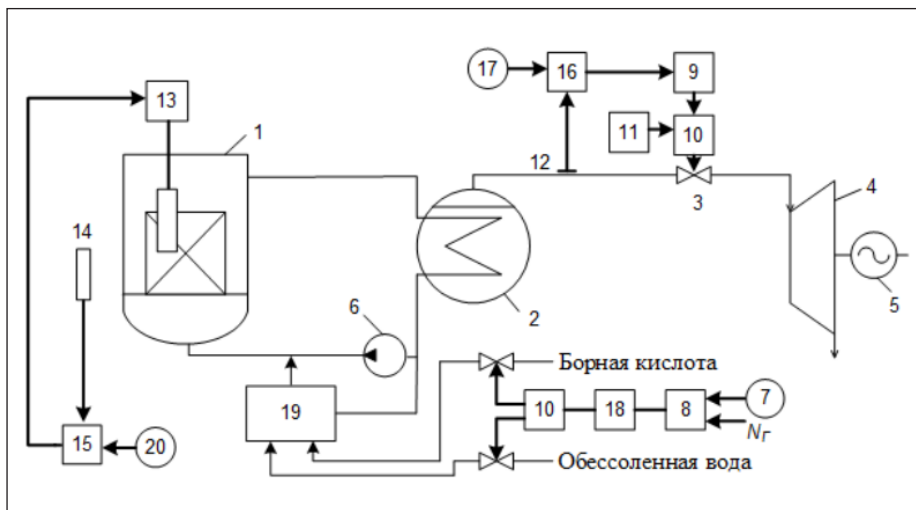


Рис. 6. Усовершенствованная принципиальная схема регулирования энергоблоков с реактором ВВЭР-1000, реализующая программу регулирования с постоянным давлением во втором контуре  $p_{II}$

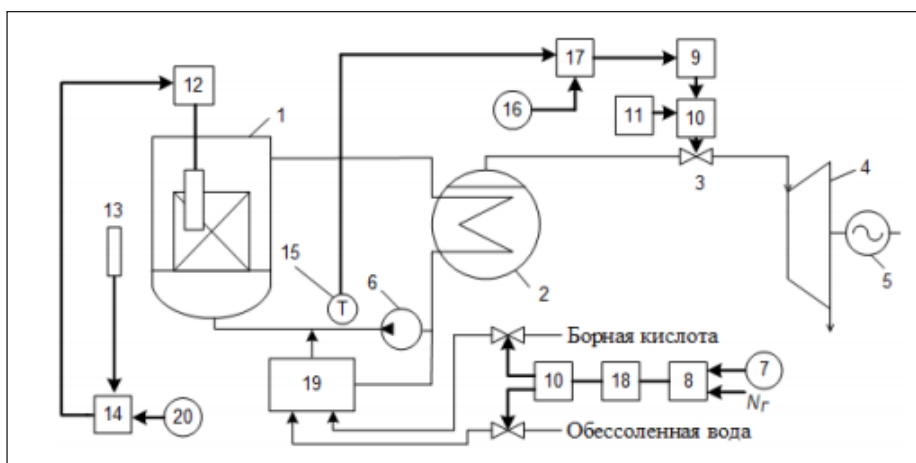


Рис. 7. Усовершенствованная принципиальная схема АСР мощностью энергоблока с реактором ВВЭР-1000, функционирующая по программе регулирования с постоянной температурой теплоносителя на входе в АКЗ реактора

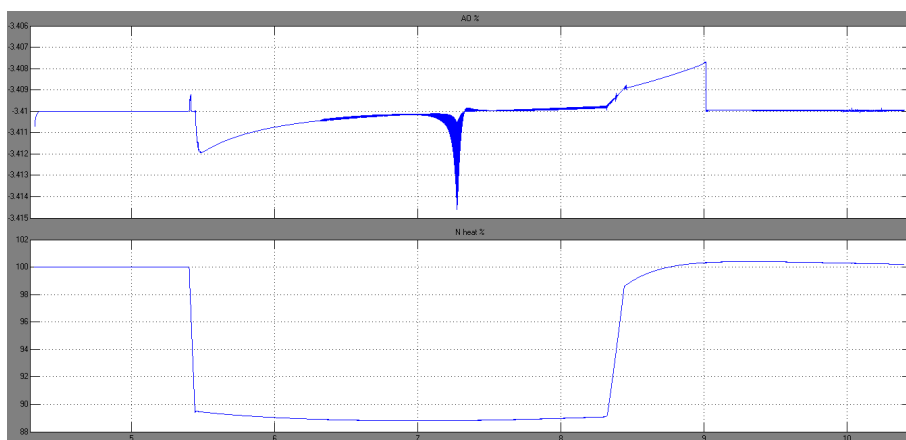
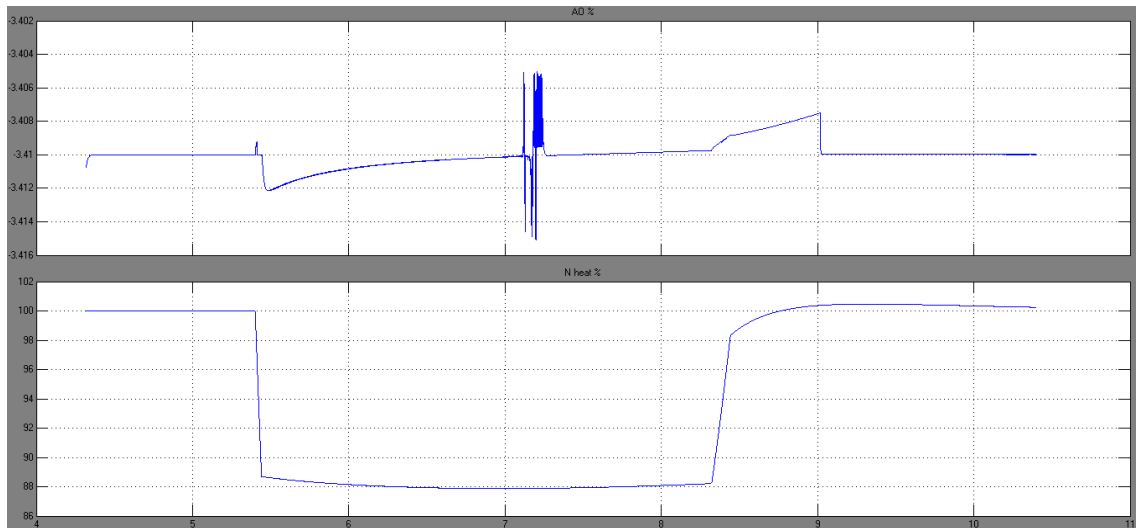


Рис. 8. График изменения АО за 36 часов работы реактора, функционирующий по усовершенствованной программе регулирования с постоянным давлением во втором контуре





**Рис. 9. График изменения АО за 36 часов работы реактора, функционирующий по усовершенствованной программе регулирования с постоянной температурой теплоносителя на входе в АКЗ реактора**

В среде Matlab, в пакете Simulink, была разработана имитационная модель работы реактора ВВЭР-1000 с нагрузкой 80% (рис. 5).

В ходе исследовательской работы, были разработаны и приведены (рис. 6,7) усовершенствованные принципиальные схемы для реализации двух выбранных программ регулирования (постоянного давления во втором контуре реактора, постоянная температура теплоносителя на входе в реактор).

При моделировании усовершенствованных принципиальных схем АСР были получены следующие графики изменения АО в режиме маневра мощностью со 100% до 80% за 36 часов работы реактора ВВЭР-1000.

Исходя из полученных графиков, можно сделать вывод, что аксиальный офсет за 36 часов

работы ректора в режиме маневрирования мощностью реактора ВВЭР-1000, со 100% до 80% и обратно на всем промежутке времени изменяется в незначительном диапазоне.

**Вывод.** В ходе сопоставления двух программ регулирования реактора ВВЭР-1000 по аксиальному офсету было определено, что за 36 часов работы реактора в режиме маневрирования со 100% до 80% и обратно на всем промежутке времени изменяется в незначительном диапазоне. Вследствие чего программа регулирования с постоянным давлением во втором контуре и программа регулирования с постоянной температурой теплоносителя на входе в АКЗ реактора, обеспечивают безопасную эксплуатацию энергоблока и могут использоваться на АЭС с реактором ВВЭР-1000.

**Список литературы:**

1. Фощ Т.В., Максимов М.В., Никольский М.В. Анализ влияния методов управления мощностью энергоблока с водо-водяным реактором на аксиальный офсет. Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2014. №2. С. 19-27.
2. Иванов В.А. Эксплуатация АЭС: Учебник для вузов, Санкт-Петербург, 1994 г. 384 с.
3. Демченко В.А. Автоматизация и моделирование технологических процессов АЭС и ТЭС, Одесса, 2001 г. 308 с.
4. Пелых С.Н. Способ стабилизации аксиального распределения нейтронного поля при маневрировании мощностью ВВЭР-1000. Ядерная и радиационная безопасность. 2011. №1. С. 27-32.
5. Бундюк А. М. Методические указания к лабораторным работам по дисциплине «Компьютерные системы анализа эффективности в энергетике», Одесса, 2005 г. 174 с.

**ПОРІВНЯННЯ ПОСТІЙНИХ РЕГУЛЮВАННЯ В РЕГУЛЯТОРІ ПОТУЖНОСТІ РЕАКТОРА ПРИ ПРОГРАМІ РЕГУЛЮВАННЯ З ПОСТІЙНИМ ТИСКОМ В ДРУГОМУ КОНТУРІ Й ПОСТІЙНОЮ ТЕМПЕРАТУРОЮ ТЕПЛОНОСІЯ НА ВХОДІ В АКЗ РЕАКТОРА ПО АКсіАЛЬНОМУ ОФСЕТУ**

*У статті розглянуто дві програми регулювання потужності реактора, зокрема програма з постійним тиском у другому контурі й постійна температура входу в реактор. Наведено принципові схеми програм регулювання. Розроблено вдосконалені схеми регулювання. Розроблено імітаційну модель реактора ВВЕР-1000. Здійснено порівняння двох програм регулювання за аксіальним офсетом при 36 годинах роботи реактора в режимі маневрування зі 100% до 80%.*

**Ключові слова:** програма регулювання, потужності реактора ВВЕР-1000, АКЗ, система автоматичного регулювання, імітаційна модель, аксіальний офсет.

**COMPARISON OF PERMANENT REGULATION IN POWER CONTROL OF THE REACTOR, WHEN THE CONTROL PROGRAM WITH A CONSTANT PRESSURE IN THE SECOND CIRCUIT AND A CONSTANT COOLANT TEMPERATURE AT THE ENTRANCE TO THE ANTICORROSION REACTOR FOR AXIAL OFFSET**

*The article considers two programs of reactor power control, a program with a constant pressure in the second circuit and a constant temperature of the reactor inlet. The basic schemes of control programs are given. Improved control schemes have been developed. A simulation model of the WWER-1000 reactor is developed. The comparison of two programs of regulation on the axial offset, at 36 hours of operation of the reactor in the maneuvering mode from 100% to 80% is made.*

**Key words:** control program, reactor power, WWER-1000, SAK, automatic control system, simulation model, axial offset.

## Відомості про авторів

- Андрущенко В.Б.** – аспірант Інституту проблем реєстрації інформації НАН України;
- Бабаков Р.М.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри прикладної математики і теорії систем управління Донецького національного університету імені Василя Стуса;
- Беглов К.В.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних технологій автоматизації Одеського національного політехнічного університету;
- Біряк В.В.** – магістр Одеського національного політехнічного університету;
- Бойко О.В.** – магістр Одеського національного політехнічного університету;
- Бондаренко А.Г.** – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри технологій міжнародних перевезень та логістики Приазовського державного технічного університету;
- Бородкін Г.О.** – старший викладач кафедри комп'ютерних наук Національного університету біоресурсів і природокористування України;
- Бородкіна І.Л.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних наук Київського національного університету культури і мистецтв;
- Ванін В.В.** – доктор технічних наук, професор, науковий керівник кафедри нарисної геометрії, інженерної та комп'ютерної графіки, декан фізико-математичного факультету Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;
- Вовк І.В.** – магістр Одеського національного політехнічного університету;
- Вус В.А.** – аспірант кафедри соціальних комунікацій та інформаційної діяльності Національного університету «Львівська політехніка»;
- Вяткін С.І.** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник лабораторії синтезуючих систем візуалізації Інституту автоматики і електрометрії СВ РАН;
- Гончар С.Ф.** – кандидат технічних наук, учений секретар Інституту проблем моделювання в енергетиці імені Г.Є. Пухова НАН України;
- Давидов В.О.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних систем автоматизації Одеського національного політехнічного університету;
- Давидов В.О.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних систем автоматизації Одеського національного політехнічного університету;
- Данова К.В.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри охорони праці та безпеки життєдіяльності Харківського національного університету міського господарства імені О.М. Бекетова;
- Демченко Ю.С.** – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;
- Дмитришин С.С.** – магістр Одеського національного політехнічного університету;
- Дуба І.Е.** – магістр Одеського національного політехнічного університету;
- Євдокименко М.О.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри інфокомунікаційних систем Харківського національного університету радіоелектроніки;
- Жученко О.А.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації хімічних виробництв Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;
- Інь Ченлянь** – магістр з телекомунікацій, аспірант Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;
- Кватернюк С.М.** – кандидат технічних наук, доцент Вінницького національного технічного університету;
- Кисельов Г.Д.** – кандидат технічних наук, доцент Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;
- Кисельова Н.І.** – магістр кафедри комп'ютерних технологій автоматизації Одеського національного політехнічного університету;
- Клепач Л.Є.** – аспірант кафедри промислової електроніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;
- Козлов Л.Г.** – доктор технічних наук, доцент, завідувач кафедри технологій та автоматизації машинобудування Вінницького національного технічного університету;
- Колосов О.Є.** – 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», заслужений винахідник України, академік Академії наук вищої освіти України;

**Колосова О.П.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри нарисної геометрії, інженерної та комп'ютерної графіки фізико-математичного факультету Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

**Комаров М.Ю.** – аспірант Інституту проблем моделювання в енергетиці імені Г.Є. Пухова НАН України, науковий співробітник Державного науково-дослідного інституту спеціального зв'язку та захисту інформації;

**Кондратець В.О.** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри автоматизації виробничих процесів Центральноукраїнського національного технічного університету;

**Конущбаєва Т.В.** – магістр Одеського національного політехнічного університету;

**Коротинський А.П.** – аспірант Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

**Кравченко А.Ю.** – аспірант Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

**Кравченко С.М.** – старший викладач кафедри інженерії програмного забезпечення Житомирського державного технологічного університету;

**Лазебний В.С.** – кандидат технічних наук, доцент Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

**Лайкова Л.Г.** – інженер кафедри промислової електроніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

**Лінгур В.М.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри підйомно-транспортного і робототехнічного обладнання Одеського національного політехнічного університету;

**Максимов М.В.** – професор кафедри комп'ютерних систем управління Одеського національного політехнічного університету;

**Малишева В.В.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри охорони праці та безпеки життєдіяльності Харківського національного університету міського господарства імені О.М. Бекетова;

**Марковець О.В.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри соціальних комунікацій та інформаційної діяльності Національного університету «Львівська політехніка»;

**Марчук Г.В.** – старший викладач кафедри інженерії програмного забезпечення Житомирського державного технологічного університету;

**Мацуї А.М.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації виробничих процесів Центральноукраїнського національного технічного університету;

**Мещеряков Д.В.** – менеджер підтримки користувачів АТ Петрософт;

**Мироненко С.С.** – аспірант другого року навчання Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

**Павлов С.В.** – доктор технічних наук, професор кафедри біомедичної інженерії Вінницького національного технічного університету;

**Палій Д.М.** – студент кафедри промислової електроніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

**Паньков С.Б.** – студент-магістрант Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

**Пасічна М.В.** – аспірант кафедри математичної інформатики факультету комп'ютерних наук та кібернетики Київського національного університету імені Тараса Шевченка;

**Пелещин А.М.** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри соціальних комунікацій та інформаційної діяльності Національного університету «Львівська політехніка»;

**Пелих С.В.** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри комп'ютерних систем автоматизації Одеського національного політехнічного університету;

**Петров О.В.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технологій та автоматизації машинобудування Вінницького національного технічного університету;

**Петросян А.А.** – магістр Одеського національного політехнічного університету;

**Погребний Я.С.** – магістр кафедри комп'ютерних технологій автоматизації Одеського національного політехнічного університету;

**Романюк С.А.** – здобувач кафедри біомедичної інженерії Вінницького національного технічного університету;

**Саць Є.П.** – студент Одеського національного політехнічного університету;

**Саць Т.О.** – студент Одеського національного політехнічного університету;

**Семенов А.О.** – кандидат технічних наук, доцент, докторант кафедри радіотехніки Вінницького національного технічного університету;

**Семенюк В.Ф.** – доктор технічних наук, професор, директор Українсько-німецького інституту Одеського національного політехнічного університету;

**Терещенко М.Ф.** – кандидат технічних наук, доцент Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

**Терещенко М.Ф.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри виробництва приладів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

**Терещенко Т.О.** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри промислової електроніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

**Трофимчук М.В.** – аспірант кафедри технологій та автоматизації машинобудування Вінницького національного технічного університету;

**Чайка Д.О.** – аспірант Харківського національного університету будівництва і архітектури

**Шаповалова А.С.** – асистент кафедри інфокомунікаційних систем Харківського національного університету радіоелектроніки;

**Ямненко Ю.С.** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри промислової електроніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

**Ямненко Ю.С.** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри промислової електроніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Науковий журнал

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

**Серія: Технічні науки**

**Том 29 (68) № 4 2018**

**Частина 1**

Коректура • *Н. Пирог*

Комп'ютерна верстка • *Н. Кузнєцова*

Адреса редакції:

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

м. Київ, вул. Івана Кудрі, 33

Електронна пошта: [editor@tech.vernadskyjournals.in.ua](mailto:editor@tech.vernadskyjournals.in.ua)

Сторінка журналу: [www.tech.vernadskyjournals.in.ua](http://www.tech.vernadskyjournals.in.ua)

Формат 60x84/8. Гарнітура Times New Roman.

Папір офсетний. Цифровий друк. Обл.-вид. арк. 19,98. Ум.-друк. арк. 27,67. Зам. № 0918/124

Підписано до друку 01.10.2018. 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](mailto:mailbox@helvetica.com.ua)

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

ДК № 4392 від 20.08.2012 р.