



*Науковий журнал*

# ЕЛЕКТРОТЕХНІКА та ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА

№3'2021

*Засновано національним університетом "Запорізька політехніка"  
у травні 1999 року*

*Виходить 4 рази на рік*

Запоріжжя

2021

Головний редактор д-р техн. наук  
Яримбаш Д.С.  
Заст. гол. редактора д-р техн. наук  
Тиховод С.М.  
Відповідальний канд. техн. наук  
секретар Коцур М. І.

ЗАКОРДОННІ ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ  
КОЛЕГІЇ

**Yunus Biçen**, Ph.D, університет Дюздже, Туреччина;  
**Zgraja Jerzy**, Ph.D, професор Лодзького технологічного університету, Лодзь, Польща;  
**Biro, Oszkar**, Ph.D, професор інституту основ і теорії електротехніки Грацького технічного, Грац, Австрія;  
**Zurek Stan**, Ph.D., науковий співробітник, Кардіфський університет, Кардіф, Великобританія;  
**Sebastian Tomy**, Ph.D, професор університету Торонто, м. Торонто, Канада, технічний експерт корпорації "Motor Drives and Control Group", Бей-Сіті, Мічиган, США;  
**Arturi, Cesare Mario**, Ph.D., професор політехнічного університету Мілана, Італія;  
**Ronseero-Clemente Carlos**, Ph.D., професор факультету Електроенергетика та електронні системи, Університет Естремадури, м. Бадахос, Іспанія;  
**José Roberto Camacho**, PhD, професор електротехніки в Uberlandia федеральний університет, Бразилія;  
**Mohamed Ahmed Moustafa Hassan**, Ph.D., професор кафедри електротехніки та електроенергетики, Каїрський університет, Гіза, Єгипет.

Включено до переліку  
наукових фахових видань України  
(наказ МОНУ № 409 від 17.03.2020 р.,  
наказ МОНУ № 1471 від 26.11.2020 р.)

ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ (Україна)

**Загірняк М. В.**, д-р техн. наук, проф., Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, м. Кременчук, Україна;  
**Зірка С. Є.**, д-р техн. наук, проф., Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, м. Дніпро, Україна; **Мілих В. І.**, д-р техн. наук, проф., Національний технічний університет «ХПІ», м. Харків, Україна; **Жильцов А. В.**, д-р техн. наук, проф., Національний університету біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна; **Паранчук Я. С.**, д-р техн. наук, проф., Національний університет "Львівська політехніка", м. Львів, Україна; **Толочко О. І.**, д-р техн. наук, проф., Київський політехнічний інститут імені І. Сікорського, м. Київ, Україна; **Бушер В. В.**, д-р техн. наук, проф., Одеський національного політехнічного університету, м. Одеса, Україна; **Андрієнко П. Д.**, д-р техн. наук, проф., НУ «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна; **Зіновкін В. В.**, д-р техн. наук, проф., НУ «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна; **Мороз Ю. І.**, канд. техн. наук, доц., Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, м. Дніпро, Україна; **Коцур І. М.**, канд. техн. наук, доц., НУ «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна; **Яримбаш С. Т.**, канд. техн. наук, доц., НУ «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна; **Шило Г. М.**, д-р техн. наук, доц., НУ «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна; **Фурманова Н. І.**, канд. техн. наук, доц., НУ «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна; **Пархоменко А. В.**, канд. техн. наук, доц., НУ «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна; **Щербовських С. В.**, д-р. техн. наук, доц., Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна; **Мартинюк В. В.**, д-р. техн. наук, проф., Хмельницький національний університет, м. Хмельницький, Україна; **Кочан В. В.**, канд. техн. наук, доц., Тернопільський національний економічний університет, м. Тернопіль, Україна; **Глоба Л. С.**, д-р. техн. наук, проф., Національний технічний університет України «КПІ ім. Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна; **Скулиш М. А.**, канд. техн. наук, с.н.с., Національний технічний університет України «КПІ ім. Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна, **Назарова О.С.**, канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна.

*Журнал включено до міжнародних наукометричних баз, каталогів та систем пошуку: Index Copernicus, CrossRef; Directory of Open Access Journals (DOAJ); OpenAIRE; Public Knowledge Project (PKP); ResearchBib - Academic Resource Index; Scientific Indexing Services (SIS); Ulrich's Periodicals Directory; WorldCat; КіберЛенінка; Наукова періодика України – проект Національної бібліотеки України імені В. І. Вернадського (НБУВ).*

У науковому журналі друкуються результати фундаментальних та прикладних досліджень, зокрема результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата технічних наук у галузі електротехніки та електроенергетики у відповідності з рубриками: 1. Електротехніка; 2. Електроенергетика; 3. Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології.

Журнал розповсюджується за Каталогом періодичних видань України (передплатний індекс – 22913)

Видавець: Національний університет "Запорізька політехніка", м. Запоріжжя. Свідectво суб'єкта видавничої справи ДК №6952 від 22.10.2019р.  
Реєстрація журналу: Журнал зареєстровано у Міністерстві юстиції України. Свідectво про державну реєстрацію KB №24219-14059 ПР від 07.11.2019р.  
Адреса редакції: Редакційно-видавничий відділ. національний університет "Запорізька політехніка", вул. Жуковського, 64, м. Запоріжжя, 69063, Україна. Телефон: +380(61)769-82-96 Факс: (061) 764-21-41 e-mail: rvv@zntu.edu.ua. Електронна адреса журналу <http://ee.zntu.edu.ua> E-mail: etae@ukr.net

Комп'ютерна верстка Дяченко О.О. Редактор англійських текстів Войтенко С.В. Журнал підписано до друку 26.08.2021 за рекомендацією вченої ради національного університету "Запорізька політехніка" (протокол №1/21 від 27.08.2021 р.). Формат 60x84/8. Ум. Др. Арк. 5,46. Тираж 300 прим. Зам. №680.

ZAPORIZHZHIA POLYTECHNIC NATIONAL UNIVERSITY

---



*Scientific journal*

# **ELECTRICAL ENGINEERING & POWER ENGINEERING**

## **№3'2021**

*Founded by Zaporizhzhia Polytechnic National University in May 1999*

*4 issues per year*

Zaporizhzhia

2021

*Editor-in-chief*Prof., Sc.D.  
Dmitro Yarymbash*Associate Editor-in-chief*Assoc. prof., Sci.D.,  
Sergiy Tihovod*Senior secretary*Assoc. prof., Ph.D.  
Mikhailo Kotsur

*The journal has been included  
scientific professional editions of Ukraine  
(Order of the Ministry of Education and Science  
№ 409 dated 17.03.2020,  
Order of the Ministry of Education and Science  
№ 1471 dated 26.11.2020)*

## FOREIGN MEMBERS OF EDITORIAL BOARD

**Yunus Biçen**, Ph.D. Duzce University, Turkey;  
**Prof. Jerzy Zgraja**, Ph.D., Lodz University of Technology, Lodz, Poland;  
**Prof. Oszkár Bíró**, Ph.D., Technical University of Graz, Graz, Austria;  
**Zurek, Stan**, Ph.D., Research Associate, Cardiff University, Cardiff, United Kingdom;  
**Sebastian Tomy**, Ph.D, Toronto University, Canada, (Technical Expert, Motor Drives and Control Group, Bay City, Michigan, USA);  
**Arturi Cesare Mario**, Ph.D., Prof., Polytechnic University of Milan, Italy;  
**Carlos Roncero-Clemente**, Ph.D., Prof., Universidad de Extremadura, Badajoz, Spain;  
**José Roberto Camacho PhD**, Prof., Universidade Federal de Uberlândia, Brazil;  
**Mohamed Ahmed Moustafa Hassan**, Ph.D., Prof., Cairo University, Giza, Egypt.

## MEMBERS OF EDITORIAL BOARD (Ukraine)

**M.V. Zagirnyak**, Sc.D., prof., Kremenchuk Michaylo Ostrogradskiy National University; **S. E Zirka**, Sc.D., prof., Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro, Ukraine; **V. I. Milykh**, Sc.D., prof., National Technical University "KhPI", Kharkiv, Ukraine; **A. V. Zhylytsov**, Sc.D., prof., National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine; **Ya. S. Paranchuk**, Sc.D., prof., Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine; **O. I. Tolochko**, Sc.D. prof., Kyiv Polytechnic National Technical University, Kiev, Ukraine; **V. V. Busher**, Sc.D., prof., Odesa National Polytechnic University, Odesa, Ukraine; **P. D. Andrienko**, Sc.D., prof., Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia, Ukraine; **V.V. Zinovkin**, Sc.D., prof., Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia, Ukraine; **Yu I. Moroz**, Ph.D., assoc. prof., Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro, Ukraine; **I. M. Kotsur**, Ph.D, assoc. prof., Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia, Ukraine; **S. T. Yarymbash**, Ph.D, assoc. prof., Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia, Ukraine; **G. M. Shilo**, Sci.D., assoc. prof., Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia, Ukraine; **N. I. Furmanova**, Ph.D., assoc. prof., Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia, Ukraine; **A. V. Parkhomenko**, Ph.D., assoc. prof., Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia, Ukraine; **S. V. Shcherbovskykh**, Sc.D., assoc. prof., Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine; **V. V. Martynyuk**, Sc.D., prof., Khmelnytsky National University, Khmelnytsky, Ukraine; **V. V. Kochan**, Ph.D., assoc. prof., Ternopil National Economic University, Ternopil, Ukraine; **L. S. Globa**, Sc.D. prof., Kyiv Polytechnic National Technical University, Kyiv, Ukraine; **M. A. Skulish**, Ph.D., assoc. prof., Kyiv Polytechnic National Technical University, Kyiv, Ukraine; **O.S. Nazarova**, Ph.D., assoc. prof., Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia, Ukraine.

*The journal included in the international scientometric databases, catalogs and search systems: Index Copernicus; CrossRef; Directory of Open Access Journals (DOAJ); Google Academy; OpenAIRE; Public Knowledge Project (PKP); ResearchBib - Academic Recourse Index; Scientific Indexing Services (SIS); Ulrich's Periodicals Directory; WorldCat; CyberLeninka; Scientific Periodicals of Ukraine — the project of the National Library of Ukraine named V.I. Vernadsky (NBUV).*

The scientific journal publishes the results of fundamental and applied research, in particular the results of dissertation papers for obtaining the scientific degrees of a Sci.D. and a Ph.D. of technical sciences in the field of electrical engineering and electrical engineering in accordance with the headings: 1. Electrical engineering; 2. Power engineering; 3. Automation and computer integrated technologies.

The journal is distributed by the Catalog of periodicals of Ukraine (subscription index – 22913)

Founder and editor: Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia. Certificate of publisher Civil Code №6952 dated October 22, 2019.

Journal was registered: by the Ministry of Justice of Ukraine. Registration number KV № 24219-14059 PR dated November 7, 2019.

Address of editor and editorial office: Zaporizhzhia Polytechnic National University, st. Zhukovsky, 64, Zaporozhia, 69063, Ukraine. Phone: +380(61)769-82-96 Fax: (061) 764-21-41 e-mail: rvv@zntu.edu.ua.

**E-address:** <http://ee.zntu.edu.ua>; **E-mail:** [etae@ukr.net](mailto:etae@ukr.net)

Computer layout Dyachenko O.O. Editor of English texts Voitenko S.V. The journal was signed on August 26, 2021 on the recommendation of the academic council of the Zaporizhzhia Polytechnic National University (Protocol No. 1/21 dated august 27, 2021). Sheet size 60x84/8. Cond. Print. Sheets 5,46. Number of copies printed 300. Rep. №680.



# ЗМІСТ

## I ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

*Верещаго Є.М., Костюченко В.І.*

Моделювання схем джерел електроживлення зварювальної дуги в  
*MATLAB / SIMULINK*.....8

*Зіновкін В.В., Близняков О.В., Крисан Ю. О., Залужний М.Ю.*

Фізичне моделювання нестационарних електромагнітних процесів у силовому трансформаторі  
при різкозмінних навантаженнях.....21

## II ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА

*Дрешпак Н.С., Дрешпак О.С., Випанасенко С.І.*

Питомі норми витрат енергії в задачі контролю ефективності її використання.....31

## III АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ

*Олішевський І.Г., Олішевський Г.С.*

Автоматизована методика розрахунку параметрів для нетрадиційних технологій  
опалення та кондиціонування будівель.....40

# CONTENTS

## I ELECTRICAL ENGINEERING

*Vereshchago E.N., Kostiuchenko V.I.*

Modeling of welding arc power supply diagrams in MATLAB / SIMULINK.....8

*Zinovkin V.V., Blyzniakov O.V., Krysan Yu.O., Zaluzhnyi M.Yu.*

Physical modeling of unsteady electromagnetic processes in power transformer under sharp load fluctuations.....21

## II POWER ENGINEERING

*Dreshpak N.S., Dreshpak O.S., Vypanasenko S.I.*

Specific standards of energy consumption in the problem of controlling its use efficiency.....31

## III AUTOMATION AND COMPUTER INTEGRATED TECHNOLOGIES

*Olishevskiy I.H., Olishevskiy H.S.*

Automated method of calculation of parameters for non-traditional heating technologies and conditioning of buildings.....40

# СОДЕРЖАНИЕ

## I ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

*Верещаго Е.Н., Костюченко В.И.*

Моделирование схем источников электропитания сварочной дуги в  
MATLAB / SIMULINK.....8

*Зиновкин В.В., Близняков А.В., Крисан Ю.О., Залужный М.Ю.*

Физическое моделирование нестационарных электромагнитных процессов в силовом  
трансформаторе при резкопеременных нагрузках.....21

## II ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

*Дрешняк Н.С., Дрешняк А.С., Выпанасенко С.И.*

Удельные нормы расхода энергии в задании контроля эффективности ее  
использования.....31

## III АВТОМАТИЗАЦИЯ И КОМПЬЮТЕРНО-ИНТЕГРИРОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

*Олишевский И.Г., Олишевский Г.С.*

Автоматизированная методика расчета параметров для нетрадиционных технологий  
отопления и кондиционирования зданий.....40

УДК 621.314

## МОДЕЛЮВАННЯ СХЕМ ДЖЕРЕЛ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ ЗВАРЮВАЛЬНОЇ ДУГИ В *MATLAB / SIMULINK*

**ВЕРЕЩАГО Є.М.** канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри морського приладобудування Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв, Україна, e-mail: venmkua@gmail.com;

**КОСТЮЧЕНКО В.І.** канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри суднових електроенергетичних систем Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв, Україна, e-mail: vikmkua@gmail.com;

**Мета роботи.** Створення віртуальних блоків і імітаційних лабораторних стендів для вивчення і всебічного дослідження динамічних властивостей зварювальних джерел живлення.

**Методи дослідження.** Огляд літературних джерел за тематикою, імітаційне моделювання електромагнітних процесів у програмному середовищі *MATLAB*, порівняльний аналіз отриманих та наявних даних.

**Отримані результати.** Виконано порівняльний аналіз засобів моделювання джерел живлення зварювальної дуги. Одним з основних параметрів, за якими порівнювалися середовища, є функціональні можливості. З розглянутих симуляторів найбільш ефективним при моделюванні розглянутих систем є *Simulink* програмного середовища *MATLAB*. Використовуючи спеціальні можливості її користувач може не тільки імітувати, а й аналізувати роботу установки в часі.

Побудовано математичні та функціональні моделі джерел живлення зварювальної дуги із застосуванням елементів *SimPowerSystems* і блоків з бібліотеки *Simulink* із залученням самої системи *MATLAB*, що істотно розширює можливості для моделювання таких систем. Математизація тих чи інших процесів в деякій мірі показує і рівень достовірності отриманих результатів та ступінь їх наукового відпрацювання. Розроблені моделі виконують роль лабораторії, що дозволяє задавати і досліджувати будь-які режими і характеристики.

Наведено чисельні експерименти і порівняльний аналіз чисельного та натурального експериментів. Експериментальна перевірка отриманих результатів на конкретних прикладах показала актуальність поставленої задачі і коректність її рішення.

Подальші дослідження пов'язані з розширенням кола модельованих джерел електроживлення електричної дуги, всебічним дослідженням їх динамічних властивостей і основних характеристик, з експериментальною перевіркою розроблених моделей, а також з порівняльним аналізом і формуванням рекомендацій щодо вдосконалення моделей.

**Наукова новизна.** Отримав подальший розвиток метод схемотехнічного моделювання електричних і електронних схем загального призначення шляхом поширення його на новий клас об'єктів - системи електроживлення електротехнологічних установок.

**Практична цінність.** Побудова математичних і функціональних моделей складних систем із залученням *MATLAB* дозволяє враховувати їх основні особливості, істотно розширює можливості для моделювання, вивчення і дослідження джерел живлення. На основі запропонованого підходу були розроблені і побудовані імітаційні лабораторні стенди конкретних джерел живлення, що дозволяють задавати і досліджувати їх будь-які режими і характеристики.

**Ключові слова:** схемотехнічне моделювання; джерело живлення; аналіз; експериментальна перевірка.

### I. ВСТУП

У багатьох електротехнологічних процесах (зварювання, наплавлення, генерування низькотемпературної плазми в електрофізичних установках та ін.), що застосовуються в різних областях науки і техніки, знаходиться широке застосування електрична дуга. Підвищення ефективності, наприклад, дугових зварювальних процесів супроводжується безперервним вдосконаленням способів управління електричною дугою, джерел її живлення. Актуальність вирішення другого завдання постійно зростає в зв'язку з вимогами технічного прогресу до якості зварних з'єднань і економічності виробництва.

Розробка нових ДЖ для дугового зварювання вимагає всебічного дослідження процесів в складній електродинамічній системі джерело живлення – дуга – зварювальна ванна. Застосовувані при цьому дослідні комплекси є дорогими і унікальними [2], [3].

Математичні методи аналізу імпульсних перетворювачів зі складною динамікою для ДЖ можуть виявитися або занадто грубими, неточними, або занадто трудомісткими для інженера-електронщика. Макетування ж витратне і забирає дуже багато часу. Значно більшою точністю, гнучкістю, простотою і наочністю результатів є комп'ютерне моделювання динамічних систем за допомогою спеціальних моде-

люючих програм.

В даний час, як правило, дослідження і проектування нових ДЖ ґрунтоване на застосуванні сучасних комп'ютерних технологій, що базуються на пакетах прикладних програм. Ці технології дозволяють на якісно новому рівні розробляти схемотехнічні і конструкторські рішення ДЖ при більш глибокому розумінні основних завдань проектування таких пристроїв. При наявності моделі досліджуваного ДЖ вирішуються практично будь-які завдання. При цьому розроблена модель виконує роль лабораторного стенду, який дозволяє без остраху щось вивести з ладу задавати і досліджувати будь-які режими і характеристики.

Ця стаття присвячена дослідженню квазівстановившихся процесів і динаміки зварювальних джерел живлення на базі розробленої віртуальної лабораторії. Результати моделювання представлені за допомогою інструментальних засобів середовища *MATLAB* + *Simulink* [4]-[7]. Для створення віртуальної лабораторії використовуються структурно-функціональні (пакет *Simulink*) і віртуальні (пакет розширення *SimPowerSystems*) блоки [4]-[7].

## II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

З 70-х років минулого століття розроблено безліч прикладних пакетів моделювання, що автоматизують, перш за все, етап подання математичної моделі для комп'ютера і дозволяють вирішувати задачі математичного і функціонального моделювання ДЖ. У науково-технічній літературі зустрічаються різні програми для ПК, що дозволяють виконувати дослідження динамічних властивостей ДЖ.

В даний час важливим питанням є вибір середовища для імітаційного моделювання джерел електроживлення для електротехнологічних процесів. Нижче розглянемо деякі прикладні пакети, що застосовуються для дослідження і проектування електронних схем.

**Порівняльний аналіз засобів моделювання електронних схем.** Вибір здійснювався серед наступних загальнодоступних програмних продуктів.

Пакет *Electronics Workbench* (*EWB*, версія 5.12), що представляє собою по суті, віртуальну лабораторію з досить широкими можливостями, є надзвичайно привабливим для вивчення і аналізу нескладних схем [5], [7], [8].

Основні недоліки пакета – дослідження режимів роботи і характеристик ланцюга обмежується номенклатурою вимірювальних приладів, вбудованих в програму [5], [7], [8]. При моделюванні дуже зручно використовувати математичні та функціональні блоки, але їх число в програмі обмежено і одночасно робота з електронними блоками не передбачена [5]. Проста в застосуванні програма *Electronics Workbench* зручна для використання переважно в навчальних цілях [5].

Програма схемотехнічного моделювання *NI Multisim* (*National Instruments*) є ідейним спадком про-

грами *Electronics Workbench*, яка була розроблена компанією *Electronics Workbench Group* [9], [10].

Для моделювання сучасних ДЖ для зварювання найбільш часто використовують прикладні пакети, в основі яких лежить система *Pspice* [11]. До цих пакетів відносяться *DesignLab*, *Micro-Cap*, *OrCAD* та ін. [12]-[15].

Програма схемотехнічного моделювання *Micro-Cap* (версія 5) [5] (компанії *Spectrum Software*) дає можливість моделювання схем середнього ступеня складності [5].

У роботах [16]-[18] аналіз процесів в інверторних ДЖ для дугового зварювання на змінному струмі здійснюється за допомогою програми *Micro-Cap*.

*DesignLab 8.0* – інтегрований програмний комплекс компанії *MicroSim*. Основними недоліками системи є те, що при зміні режиму один екран повністю замінюється іншим, виконаним в іншому стилі, що ускладнює її освоєння початківцем користувачем [5].

Популярністю у інженерів користується програма *VisSim* фірми *Visual Solutions*. Завдяки доступності, простоті застосування і зручному інтерфейсу [19] вона представляє потужний і зручний для користувача компактне і ефективний засіб моделювання систем і їх елементів. Цікаво, що *VisSim* перевершує інші системи моделювання в швидкості [5], [19].

Застосування пакета *VisSim* для аналізу схем ДЖ зварювальної дуги, що здійснює так зване візуальне проектування (моделювання), було розглянуто в роботі [20]. Крім [20], розглянутий підхід використовується в дослідженнях [21]-[23].

Особливості застосування програми *PSIM* для аналізу процесів в зварювальному інверторі були розглянуті в роботі [24]. Потужним і освоєним засобом моделювання електронних систем є різні версії середовища *OrCAD*. Середовище *OrCAD* (версії 9.2-10.0) [13], [14] – інтегрований пакет корпорації *Cadence*, що базується на відомій програмі моделювання *Pspice*, що дає можливість істотного спрощення моделей схем силової електроніки при збереженні прийнятної точності отриманих результатів.

У дослідженнях [13], [14] розглядається підхід до побудови моделей систем силової електроніки, який передбачає використання різних версій середовища *OrCAD*.

Для аналізу процесів, що відбуваються в схемах зварювальних випрямлячів, добре зарекомендувала себе програма *LTspice / SwitcherCad III (IV)* (скорочено *SwCad* від компанії «*Linear Technology*») [25]-[30]. Це й не дивно, оскільки вона до того ж безкоштовна.

Незважаючи на свої переваги, даний підхід також не може бути рекомендований для аналізу схем зварювальних ДЖ, оскільки він не враховує особливості системи «джерело живлення - дуга - зварювальна ванна» і правила створення загальної моделі всієї системи.

Великий інтерес у розробників ДЖ викликає система комп'ютерної математики *MATLAB* [4], [5], [31], [32]. Перші версії її з'явилися близько 38 років тому. Система *MATLAB* відкрита і постійно вдосконалюється (серйозна перевага), що проявляється в появі нових версій. Наприклад, система *MATLAB* 8.0 + *Simulink* 8.0 (R2012b) (*MathWorks*) завдяки пакетам розширення *Simscape* і *SimElectronics* перетворилася в зручну систему блочного схемотехнічного моделювання електричних і електронних схем з відкритим програмним кодом і зрозумілою математичною і фізичною орієнтацією. Цим вона вигідно відрізняється від відомих пакетів схемотехнічного моделювання типу *OrCAD*, *Pspice*, *Micro-Cap* і т.п. До теперішнього часу автори практично не зустріли жодної задачі, пов'язаної з дослідженням систем електроживлення, яку не можна було б вирішити в цьому пакеті.

Складні електротехнічні системи засобами самого *MATLAB* можна моделювати, поєднуючи методи імітаційного, функціонального і структурного моделювання, що дозволяє значно спростити всю модель, економити пам'ять, а значить, підвищити її працездатність і швидкість розрахунку.

Виходячи з вищевикладеного, для моделювання ДЖ зварювальної дуги будемо використовувати пакети *SimPowerSystems* і *Simulink* середовища *MATLAB*.

Перші роботи по застосуванню пакета *MATLAB* / *Simulink* для моделювання ДЖ для зварювання, споріднених процесів і технологій з'явилися в кінці ХХ - початку ХХІ століття. Зокрема, в [33] розглядається моделювання інверторного джерела живлення індуктора, а в роботі [34] – спрощена модель зварювального інвертора без урахування зворотних зв'язків.

Дана робота лежить в руслі робіт, присвячених схемотехнічному моделюванню джерел живлення електричної дуги в системі *MATLAB* + *Simulink*.

### III. МЕТА РОБОТИ

Побудова моделей джерел живлення для дугового зварювання на основі *MATLAB*. Моделювання конкретних технічних пристроїв на рівні фундаментальних фізичних процесів. Порівняльний аналіз діаграм імітаційного моделювання з отриманими експериментальними результатами. Підтвердження правильності моделювання.

### IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГУ МАТЕРІАЛУ І АНАЛІЗ ОТРИМАННИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

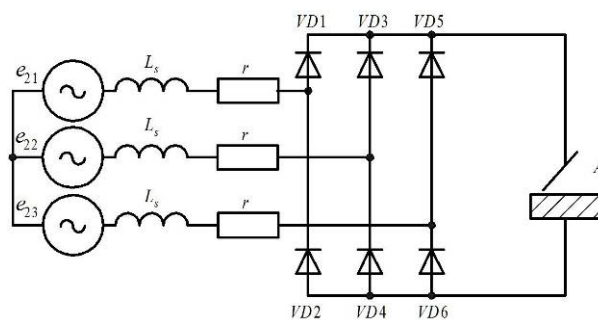
У статті показані можливості використання пакету *MATLAB* для вирішення широкого кола завдань при моделюванні різних ДЖ зварювальної дуги, досліджені наскільки достовірними є результати такого моделювання шляхом порівняння з осцилограмами, отриманими на реальних зварювальних випрямлячах, розглянуті особливості побудови, настройки і налагодження віртуальних моделей випрямлячів і інверторів, що представляють собою напівпровідникові ключі і електротехнічні елементи.

чі і електротехнічні елементи.

**Промисловий випрямляч ВД-306С1.** Почнемо з найбільш простого з точки зору практичної реалізації – традиційного зварювального випрямляча. Випрямляч ВД-306С1 відноситься до випрямлячів, керованим трансформатором зі збільшеним розсіюванням [35]. Регулювання струму випрямляча в даному випадку здійснюється зміною індуктивного опору трансформатора за рахунок переміщення трифазних обмоток, а також зміною їх з'єднання. При збільшенні відстані між обмотками  $I_{об}$  збільшується розсіювання і опір фази трансформатора  $X$ , тому випрямлені напруга  $U_B$  і струм дуги  $I_D$  зменшуються:

$$I_{об} \uparrow \Rightarrow X \uparrow \Rightarrow U_B \downarrow \Rightarrow I_D \downarrow.$$

Схема заміщення трифазного зварювального випрямляча ВД-306С1, що працює на дугу А, зображена на рис. 1.



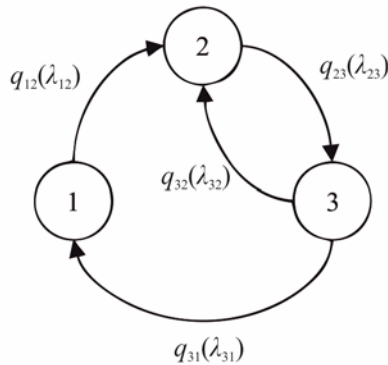
**Рисунок 1.** Параметри тексту елементів формули  
Схема заміщення трифазного випрямляча з активними і реактивними опором фази, що працює на дугове навантаження

Головною особливістю такого роду споживачів є наявність власної ЕРС  $U_0$ , яка спрямована назустріч ЕРС випрямляча. В результаті струм, що протікає через навантаження, буде визначатися різницею двох ЕРС – ЕРС випрямляча і ЕРС приймача.

При зварюванні напруга на дузі слабо залежить від струму, тому можна вважати, що випрямляч працює на протиЕРС, відповідну лінії сталих режимів  $U_D = 20 + 0,04I_{зв}$  для зварювання штучними електродами і  $U_D = 14 + 0,05I_{зв}$  – для зварювання в середовищі вуглекислого газу. Тому в подальшому, моделюючи зварювання, замість баластного опору слід включити зустрічну ЕРС, відповідну способу зварювання.

Процес перенесення електродного металу при зварюванні плавленням може бути представлений у вигляді граф-схеми (рис. 2), де виділено такі режими: 1 – холостий хід; 2 – горіння дуги; 3 – коротке замикання [36].

Дугове зварювання відрізняється відсутністю жорсткої послідовності чергування режимів, що обумовлено впливом зовнішніх факторів і недермінованим характером дії оператора.



**Рисунок 2.** Граф станів процесу крапельного переносу електродного металу з урахуванням перехідних ймовірностей  $q_{jk}$  і інтенсивностей переходу  $\lambda_{ik}$  для можливих станів 1-3

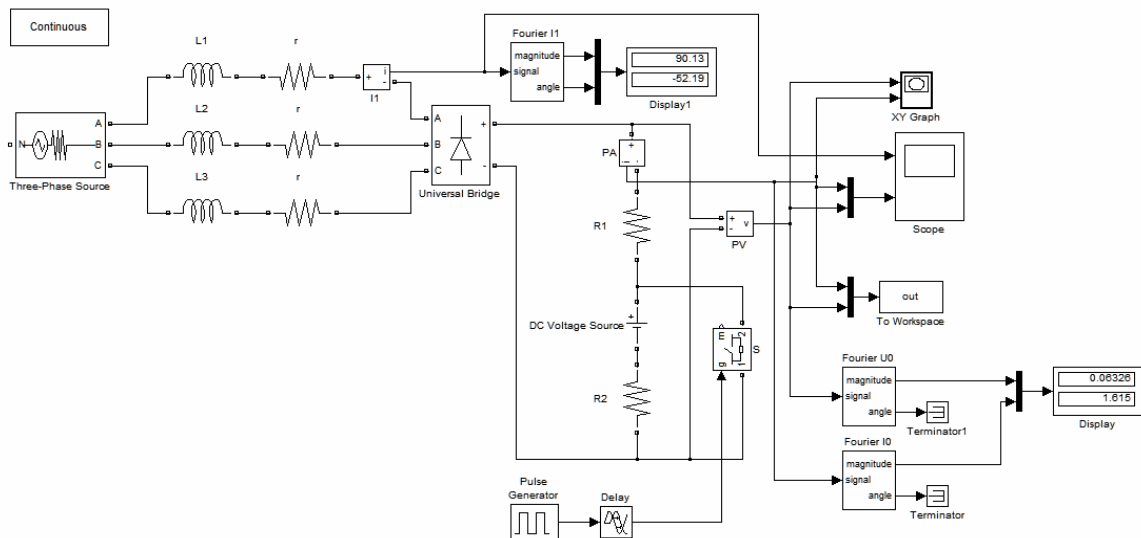
Зварювання з короткими замиканнями, пов'язаними з перенесенням електродного металу, можна моделювати включенням керованого напругою перемикача [37].

**Дослідження трифазного випрямляча, що працює на дугове навантаження.** Віртуальна модель трифазного випрямляча представлена на рис. 3.

Вихідні дані для моделі: діюче значення фазної напруги живлення (ЕРС вторинної обмотки трансформатора) 40 В, частота змінного струму 50 Гц, фазовий зсув фази А  $0^\circ$ , параметри навантаження:  $U_0 = 20$  В,  $R = 0,04$  Ом, індуктивності фаз:  $L_{s1} = 0,9$  мГн,  $L_{s2} = 0,83$  мГн,  $L_{s3} = 0,7$  мГн, опір в фазі

випрямляча (внутрішній опір вентилів і опір обмоток трансформатора)  $r = 0,01$  Ом.

Схема моделі (рис. 3) містить джерело трифазної синусоїдальної напруги 3-Phase Source, трифазний діодний міст Universal Bridge, до виходу якого підключено навантаження, вимірювачі миттєвих струмів в джерелі живлення і постійної складової (середнього значення) струму навантаження, вимірювачі миттєвого і середнього значення напруги на навантаженні, блок для спостереження струму навантаження і напруги на навантаженні (Scope), графічний пристрій XY Graph. На моделі перевіряється робота в двох режимах – навантаження і зварювання з періодичними короткими замиканнями. Останній режим, пов'язаний з переносом електродного металу забезпечується підключенням постійного опору  $R1$  і опору  $R2$ , комутованого ідеальним керованим ключем Ideal Switch. Зазначений ключ управляється генератором Pulse Generator, який виробляє послідовність прямокутних імпульсів амплітудою 1 В із заданими періодом і шпаруватістю через блок затримки Delay. На схемі резистор  $R2 = 0,04$  Ом забезпечує заданий режим зварювання, а  $R1 = 0,00025$  Ом моделює опір, відповідне опору рідкого металу, що замикає дугового проміжок. Ключ із заданою частотою перемикає джерело живлення з  $R2$  на  $R1$ , задаючи режим КЗ. Тривалість КЗ дугового проміжку ( $\tau_{кз}$ , мс), тривалість циклу – період створення і перенесення краплі ( $T_{кз}$ , мс) вибираються на підставі літературних даних [35], [37] або виходячи з проведених експериментів.



**Рисунок 3.** Віртуальна модель трифазного випрямляча ВД-306С1

**Моделювання зварювального інвертора «Nebula-315».** На практиці в розглянутих ДЖ з ланкою підвищеної частоти частота імпульсної модуляції перевищує на порядок і більше власну частоту вихідного фільтра [20], тобто параметри силового ланцюга

такі, що дотримуються нерівності:

$$T_K |\lambda_i| \ll 1 \quad (i = 1, 2, \dots, n),$$

де  $|\lambda_i|$  – модулі коренів характеристичного рівняння для силового ланцюга;  $T_K = 1/f_K$  – період комутації ключів.

Тому найчастіше інвертор в ДЖ з високим ККД і схемою ШІМ розглядається як безінерційна ланка [4], [5]. У той же час параметри силової частини імпульсного перетворювача напруги роблять значний вплив на його статичні та динамічні характеристики. При цьому якщо в якості вихідної величини виступає струм навантаження, то динаміка модуляційного джерела живлення повністю визначається динамічними властивостями силового фільтра і навантаження. З огляду на це, узагальнену схему заміщення ДЖ з модуляцією можна уявити як сукупність силової частини, навантаження з конденсаторним фільтром і системи управління (рис. 4). При формуванні такої схеми виділені лише елементи, що визначають динамічні властивості системи.

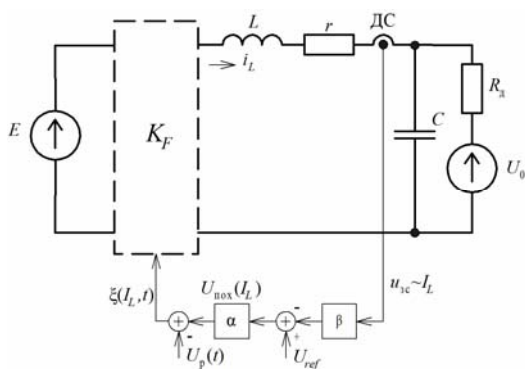
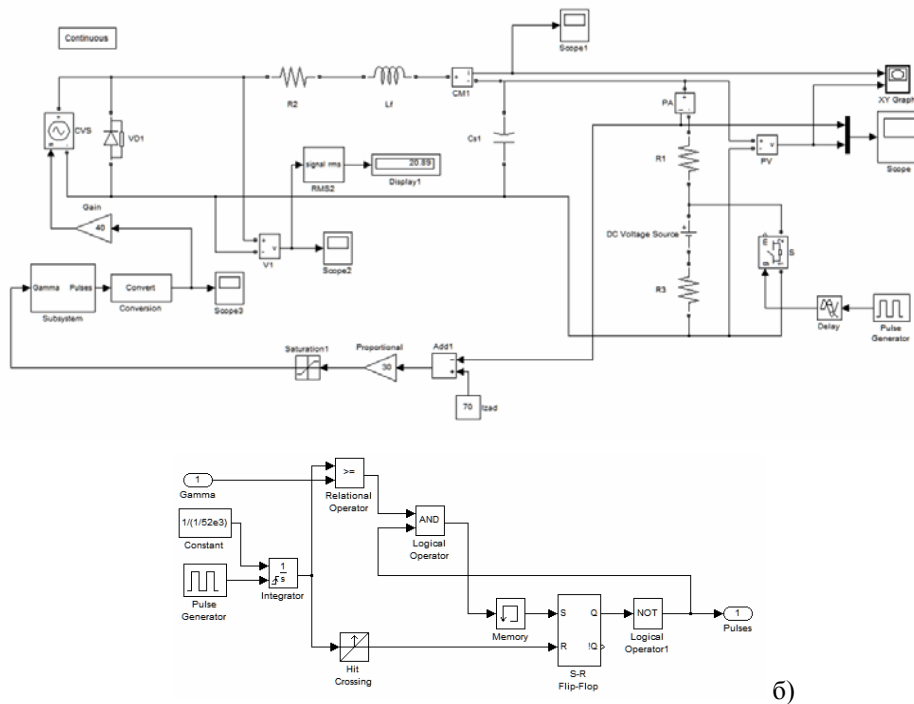


Рисунок 4. Схема заміщення стабілізатора струму дуги

Схема заміщення стабілізатора струму представлена ідеальними елементами, але математичні моделі цих елементів враховують глобальні нелінійності і постійні часу, що дозволяє обчислити і проаналізувати основні динамічні режими.

На схемі заміщення позначено:  $E$  – напруга живлення;  $r$  – опір, що характеризує втрати в індуктивності і регуляторі;  $L$  і  $C$  – індуктивність і ємність фільтра перетворювача; ДС – датчик струму;  $R_d$  – динамічний опір дуги;  $U_0$  – джерело напруги навантаження;  $U_{ref}$  – задаюча напруга (завдання по струму);  $u_{sc}$  – сигнал зворотного зв'язку по струму;  $\beta$  – коефіцієнт передачі датчика зворотного зв'язку по струму дроселя  $I_L$ ;  $\alpha$  – коефіцієнт посилення пропорційної ланки регулятора;  $U_p(t)$  – розгортуюча напруга. Власне ключовий перетворювач представлений тут комутаційною функцією  $K_F(\xi) = \text{sign}(\xi)$ , яка визначається через рівняння  $\xi(I_L, t) = U_{nox}(I_L) - U_p(t) = 0$  зворотного зв'язку, де  $U_{nox}(I_L) = \alpha(U_{ref} - \beta I_L(t))$  [38].

Моделльне дослідження динаміки інверторного випрямляча для дугового зварювання дозволяє побудувати функціональну модель, що відображає фізику його роботи. Така модель наведена на рис. 5. Модель містить силову, керуючу і вимірювальну частини і реалізована за допомогою блоків основної бібліотеки Simulink. Представлення результатів моделювання реалізується інструментальними засобами середовища MATLAB / Simulink. Робота цієї моделі цілком очевидна.



a)

b)

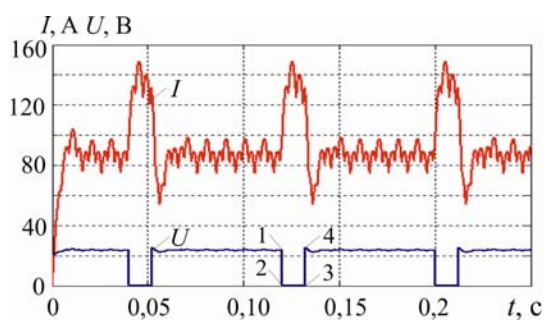
Рисунок 5. Віртуальна модель перетворювача для визначення динамічних характеристик джерела живлення (а) з підсистемою (б), що містить блок широтно-імпульсного модулятора (ШІМ)



Тут вихідна напруга першого (мережевого) випрямляча представлена постійною напругою  $E = 40$  В, а вихідний фільтр – реактивними елементами  $L = 300$  мкГн,  $C = 10,0$  мкФ з втратами, які враховуються опором  $r = 0,01$  Ом, що включає і внутрішній опір вторинного ланцюга (зварювального контуру) ДЖ. Через  $\alpha(30,0)$  і  $\beta(1,0)$  позначені коефіцієнти передачі підсилювача неузгодженості і вимірювача струму дроселя. Частота роботи перетворювача 52 кГц.

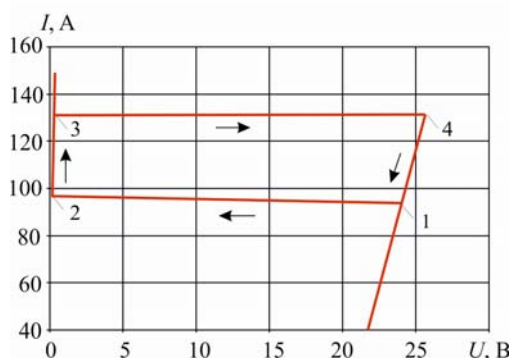
Послідовно розглядається робота моделі на дугове і резистивне навантаження в двох режимах - при відсутності і наявності згладжуючого конденсатора.

Після побудови моделі (рис. 3), настройки її блоків і запуску отримані часові діаграми (рис. 6). Видно, що пікове значення струму КЗ досягає 148 А, а швидкість його наростання – 11 кА/с,  $I_{\min} = 55$  А,  $v_{\text{спада}} = 12$  кА/с,  $I_{\text{св}} = 89$  А,  $U_{\text{д}} = 21,6$  В.



**Рисунок 6.** Зміна напруги на дуговому проміжку  $U_{\text{д}}$  і зварювального струму  $I_{\text{зв}}$  в моделі

ДХ має вигляд трапеції (рис. 7) і відображає траєкторію руху робочої точки. При цьому в процесі КЗ точки 1 і 2 визначають напругу і струм початку КЗ, а точки 3 і 4 – закінчення. Величини струму і напруги визначаються параметрами силового ланцюга ДЖ.

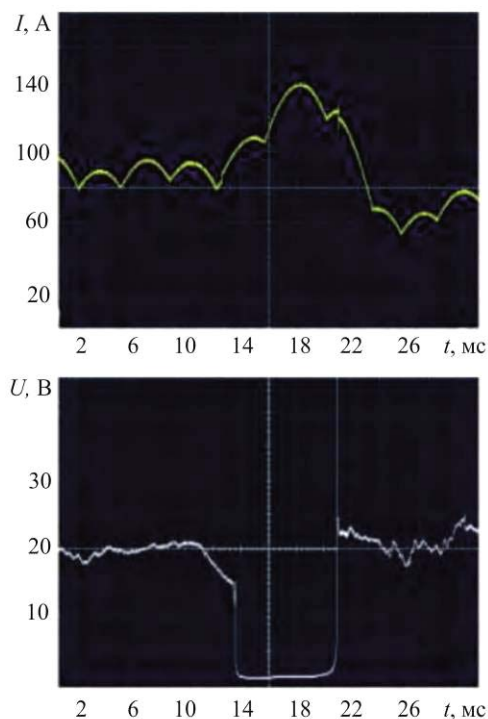


**Рисунок 7.** Динамічна характеристика короткого замикання при зварюванні випрямленим пульсуючим струмом

При зварюванні випрямленим пульсуючим струмом (рис. 6) можливі також режими, коли початок і

закінчення КЗ відбувається на спаді струму пульсації. Такі режими забезпечують зниження розбрикування електродного металу. В даному випадку лінії, які є продовженням бічних сторін трапеції показують в якій фазі пульсації відбувається початок і закінчення КЗ (рис. 7).

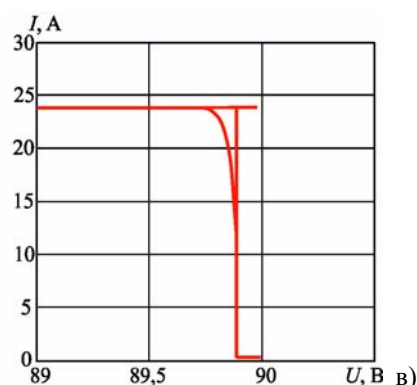
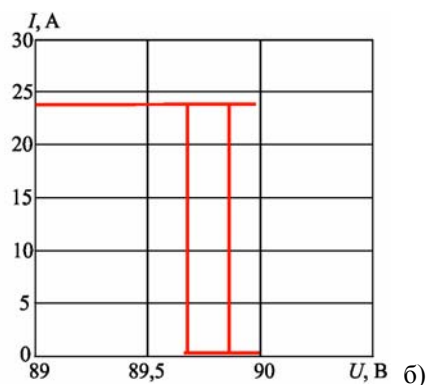
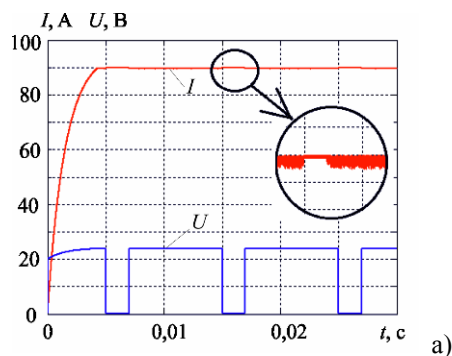
Осцилограми (експеримент) струму в зварювальному ланцюзі і напруги між електродом і виробом (електроди марки LB-52U діаметром 3,2 мм) для підтвердження адекватності результатів моделювання представлені на рис. 8 [1].



**Рисунок 8.** Осцилограми зварювального струму  $i_{\text{зв}}(t)$  і напруги на дузі  $u_{\text{д}}(t)$  в реальній схемі (експеримент): випрямляч ВД-306С1 (електроди марки LB-52U діаметром 3,2 мм) [1]

З порівняння осцилограм реального процесу зварювання (рис. 8) з осцилограмами його моделі (рис. 6) випливає, що обидві порівнювані часові діаграми аналогічні: середні значення струму 88,4 А і напруги 19,4 В практично рівні і чисельні значення максимуму (131,9 А) і мінімуму (59,6 А) і швидкостей наростання (9,9 кА/с) і спаду (12,5 кА / с) струму КЗ також відповідають один одному. Таким чином, отримуємо осцилограми, практично ідентичні реальним, знятим з промислового випрямляча ВД-306С1 світлопроменевим осцилографом (рис. 8).

Після запуску першого варіанту моделі (рис. 5) отримані часові діаграми струму і напруги на навантаженні (рис. 9).



**Рисунок 9.** Часові діаграми струму і напруги на виході інверторного випрямляча (а) і ДХ (б і в) при роботі на дугове навантаження

На верхній діаграмі представлений зварювальний струм при стрибку вхідного сигналу і нульових початкових умовах і комутації навантаження, на нижній – напруга на дузі.

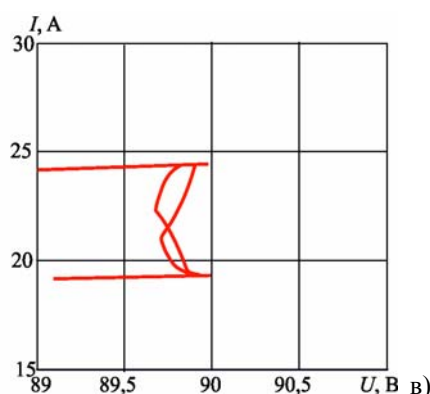
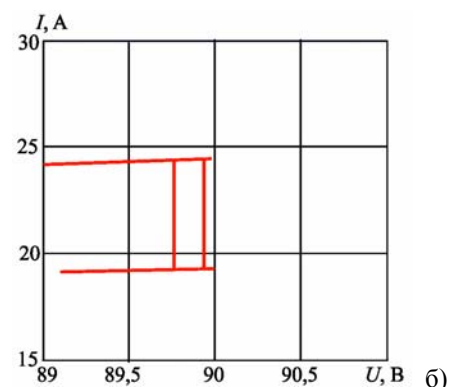
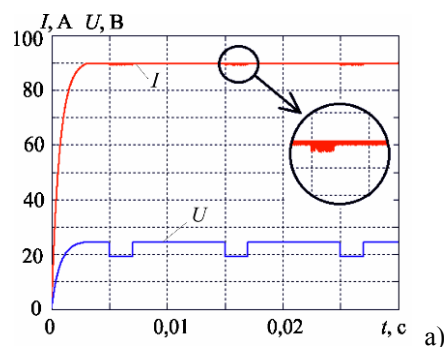
Як видно, процес встановлення вихідного струму монотонний, без викидів і коливальності. Час підготовки до роботи (включення) становить 1,25 мс. Зауважимо, що, як правило, неприпустимо поява різких змін вихідного струму або напруги при запуску, випереджуючих постійне плавне наростання  $i_{\text{вих}}$  ( $u_{\text{вих}}$ ).

Тепер розглянемо перехідні процеси в перетворювачі при стрибкоподібній зміні опору навантаження. Стабілізатор струму піддається різним дестабілізуючим впливам, зокрема зміні вхідної напруги і напруги (струму) навантаження. Часто опір наванта-

ження змінюється в часі. Цей факт враховується в моделі перетворювача, що має навантаження, опір якого змінюється по імпульсному закону.

На вихід перетворювача підключені постійні опори  $R1 = 0,27 \text{ Ом}$  і опір  $R2 = 0,27 \text{ Ом}$ , що комутується електронним ключем з частотою 0,1 кГц.

Відповідно до часових діаграм (рис. 10) імпульсне навантаження є причиною появи комутаційних процесів в напрузі і струмі на виході перетворювача. При зменшенні опору навантаження має місце сплеск (викид) струму, що не перевищує 0,25% від рівня вихідного струму і провал вихідної напруги, а при збільшенні опору – провал струму приблизно тієї ж величини (рис. 10).



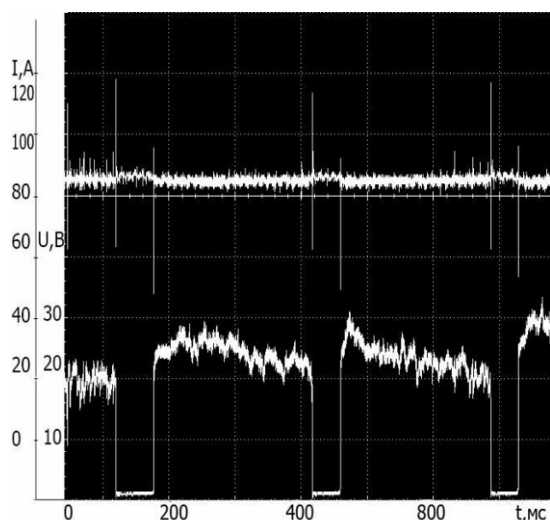
**Рисунок 10.** Часові діаграми струму і напруги на виході інверторного випрямляча (а) і ДХ з активним  $R$ -навантаженням (б) і активно-емнісним  $RC$ -навантаженням (в)

Перехідні процеси в моделі в другому випадку показані на рис. 10. Процес наростання вихідного струму (рис. 10) при нульових початкових умовах відображає часова діаграма, отримана після запуску моделі.

Для резистивного навантаження відхилення середнього значення струму на виході випрямляча становить 0,19 А (0,21%), а для дугового навантаження – 0,18 А (0,2%). При наявності згладжуючого конденсатора ємністю 10 мкФ часові діаграми струму і напруги на навантаженні практично не відрізняються від розглянутих вище.

Динамічні характеристики в координатах струму дроселя (вісь ординат) від напруги на дузі (вісь абсцис) при дуговому і резистивному навантаженні з ємністю представляють собою складні криві (рис. 9, 10).

Осцилограми процесу зварювання при використанні інверторного випрямляча «Nebula-315» наведені на рис. 11 [1].



**Рисунок 11.** Осцилограми струму в зварювальному ланцюгу і напруги між електродом і виробом (електроди марки LB-52U діаметром 3,2 мм): інверторний випрямляч «Nebula-315»

Порівняння даного результату з рис. 8 підтверджує, що криві зміни  $u_d(t)$ ,  $i_{зв}(t)$  виявилися практично близькими. Напруга на навантаженні і струм дроселя в перехідному і усталеному режимах в моделі в точності збігається з експериментальними значеннями.

Різниця в діаграмах зміни струму в зварювальному ланцюзі і напруги між електродом і виробом (рис. 3, рис. 8) полягає в тому, що динамічні властивості інверторного ДЖ вище і якісні показники випрямленої напруги краще, ніж у традиційного випрямляча.

Порівнюючи схеми зварювальних випрямлячів, можна зробити висновок, що по пульсаціям випрям-

леної напруги інверторна схема більш вигідна, ніж традиційна (коефіцієнт пульсацій для першої схеми складає 25%, а для другої – 65% [1]). Тому використання інверторного випрямляча дозволяє отримати істотно стабільніший процес.

Застосування інверторних ДЖ для РДЗ покритими електродами з більшою швидкістю зміни енергетичних параметрів одного мікроциклу режиму зварювання (як це видно з рис. 5, 10, в середньому в 2 рази) в порівнянні з традиційними діодними випрямлячами забезпечує підвищення стабільності процесу зварювання і ефективності тепломасопереноса:

- зменшення обсягу крапель, що переносяться в зварювальну ванну;
- зменшення середньої тривалості горіння дуги на інтервалах плавлення електрода і періоду формування крапель електродного металу;
- зменшення розбризкування електродного металу;
- поліпшення структури і властивостей зварного з'єднання [1].

Загальний висновок з отриманих результатів моделювання полягає в тому, що:

- адекватність структурної моделі ДЖ підтверджується результатами аналізу перехідних і усталених режимів;
- всебічні дослідження динамічних властивостей ДЖ для РДЗ може бути здійснено з використанням віртуальних моделей, в яких враховані як лінійні, так і нелінійні властивості;
- моделювання може істотно полегшити рішення задач по оптимальному вибору параметрів схеми зварювального ДЖ і поліпшити техніко-економічні показники випрямлячів, що випускаються;

- результати моделювання можуть бути застосовані в практиці при створенні та модернізації зварювального устаткування;

- розроблені моделі виконують роль лабораторного стенду, який дозволяє без остраху щось зіпсувати, задавати і досліджувати будь-які режими і характеристики.

Завдяки пакетам розширення [4, 5] система *MATLAB + Simulink* набула основні можливості систем схемотехнічного моделювання електронних і електричних схем загального призначення. З розглянутих вище засобів імітаційного моделювання на прикладі системи джерело живлення - електрична дуга видно, що її застосування є найбільш ефективним і поширеним засобом для дослідження і вирішення завдань проектування таких пристроїв. Грамотне використання пакета істотно підвищує достовірність отриманих результатів.

Візуальні моделі, описані в даній статті, дозволяють провести дослідження будь-яких режимів і динамічних процесів в конкретних системах і перекона-

тися в аналогічності результатів аналізу з наведеними експериментальними.

Побудова моделей складних систем носить суб'єктивний характер, що призводить до виникнення помилок, пов'язаних з некомпетентністю аналітика, недостатньо докладним описом предметної області і т.д. Таким чином, перед тим, як модель даної системи буде використана, вона повинна бути проаналізована з точки зору наявності недоліків.

В області схемотехнічного моделювання класикою є програми класу *SPICE* і *PSPICE*, моделі яких стали стандартними в напівпровідниковій електроніці. Однак вони мають обмежений функціонал візуалізації і автоматизації проведення чисельного експерименту прогнозування та ідентифікації нелінійних явищ в системах електроживлення, малоефективні при розрахунках системи джерело живлення - дуга - зварювальна ванна, зважаючи на відсутність в них механізму створення загальної моделі всієї системи. Ці недоліки відсутні в системі *MATLAB*. Тому в даний час середовище *MATLAB* є одним з поширених пакетів для проведення чисельних експериментів в області систем електроживлення. Поєднуючи методи імітаційного і структурного моделювання вона дозволяє значно спростити всю модель, а значить, підвищити її працездатність і швидкість роботи, скоротити час підготовки чисельного експерименту.

Побудова математичних і функціональних моделей таких систем із залученням *MATLAB* дозволяє враховувати їх основні особливості, істотно розширює можливості для моделювання, вивчення і дослідження джерел живлення.

Результати дослідження можуть бути застосовані при створенні і модернізації зварювального устаткування і для розширення кола модельованих пристроїв і систем.

## V. ВИСНОВКИ

Виконано порівняльний аналіз засобів моделювання джерел живлення зварювальної дуги. Одним з основних параметрів, за якими порівнювалися середовища, є функціональні можливості. З розглянутих симуляторів найбільш ефективним при моделюванні розглянутих систем є *Simulink* програмного середовища *MATLAB*. Використовуючи спеціальні можливості її користувач може не тільки імітувати, а й аналізувати роботу установки в часі.

Побудовано математичні та функціональні моделі джерел живлення зварювальної дуги із застосуванням елементів *SimPowerSystems* і блоків з бібліотеки *Simulink* із залученням самої системи *MATLAB*, що істотно розширює можливості для моделювання таких систем. Математизація тих чи інших процесів в деякій мірі показує і рівень достовірності отриманих результатів та ступінь їх наукового відпрацювання.

Наведено чисельні експерименти і порівняльний аналіз чисельного та натурального експериментів. Експе-

риментальна перевірка отриманих результатів на конкретних прикладах показала актуальність поставленої задачі і коректність її рішення.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Ильященко, Д.П. Влияние энергетических параметров инверторных источников питания на структуру и свойства неразъёмных соединений при ручной дуговой сварке: автореф. дис. канд. техн. наук: спец. 05.02.10 «Сварка, родственные процессы и технологии» / Ильященко Дмитрий Павлович; ФГБУН Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук. – Томск, 2017. – 19 с.
- [2] Болотовский, Ю.И. Некоторые аспекты моделирования систем силовой электроники / Ю.И. Болотовский, Г.И. Таназлы // Силовая электроника. – 2006. – №4. – С. 78-83.
- [3] Болотовский, Ю.И. *ORCAD 9.x, ORCAD 10.x. Практика моделирования* / Ю.И. Болотовский, Г.И. Таназлы. – М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2010. – 208 с.
- [4] Володин, В.Я. Современные сварочные аппараты своими руками / В.Я. Володин. – СПб.: Наука и техника, 2008. – 304 с.
- [5] Волович, Г.И. Моделирование одноконтурных *DC/DC*-преобразователей в пакете *VisSim* / Г.И. Волович // Современная электроника. – 2005. – №3. – С. 56-61.
- [6] Клиначёв, Н.В. Моделирование систем в программе *VisSim*. Справочная система / Н.В. Клиначёв. – Челябинск: ЮУрГУ, 2001. – 174 с.
- [7] Володин, В.Я. Продвинутое источники сварочного тока / В.Я. Володин // Силовая электроника. – 2014. – №4. – С. 82-90.
- [8] Крампит, М.А. Расчёты электронных схем источников питания для сварки в программе *LTSpice IV* / М.А. Крампит, Е.А. Зернин // Актуальные проблемы современного машиностроения: сборник Трудов Международной научно-практической конференции, г. Югра, 11-12 декабря 2014 г. – Томск: Изд-во ТПУ, 2014. – С. 372-376.
- [9] Ульянова, О.В. Информационно-измерительная система для аттестации источников питания дуговой сварки на основе параметров Марковской модели процесса плавления: автореф. дис. канд. техн. наук: спец. 05.11.16 «Информационно-измерительные и управляющие системы (по отраслям)» / Ульянова Ольга Викторовна; Волгоградский государственный технический университет. – Волгоград: ВГТУ, 2006. – 17 с.
- [10] Казаринов, Л.С. Исследование процессов в многоканальных стабилизаторах тока светоизлучающих диодов на основе моделирования / Л.С. Казаринов, Е.В. Вставская, Дж.А. Саид // Проблемы энергетики. – 2017. – Т.19. – №3-4. –

- С. 168-175.
- [11] Бабков, А.В. Лабораторный практикум по курсу «Моделирование систем» / А.В. Бабков, А.В. Илюхин, А.М. Колбасин, В.С. Селезнев. – М.: МАДИ, 2015. – 64 с.
- [12] Карпов, А.В. Современные программные средства структурно-функционального и схемотехнического моделирования / А.В. Карпов, С.А. Калабанов, Р.И. Шагиев. – Казань: Казан. ун-т, 2013. – 36 с.
- [13] Соловьёв, В.А. Моделирование в среде *NI Multisim* понижающего импульсного регулятора постоянного тока / В.А. Соловьёв // Альманах современной науки и образования. – 2015. – №7(97). – С. 120-125.
- [14] Татуйко, П.С. Моделирование переходных процессов полумостового резонансного преобразователя в *MATLAB SIMULINK* / П.С. Татуйко, А.И. Власов // САПР и моделирование в современной электронике: сб. научн. тр. I Международной научно-практической конференции под ред. Л.А. Потапова, А.Ю. Дракина. – Брянск: БГТУ, 2017. – С. 37-40.
- [15] Кубов, В.И. Исследование схем импульсных источников питания в *SwCAD/LTspice* / В.И. Кубов. – К.: МК-ПРЕСС, СПб.: КОРОНА-ВЕК, 2015. – 208 с.
- [16] Негода, Е.Н. Сравнительный анализ источников питания сварочной дуги / Е.Н. Негода, А.П. Таран, П.Б. Юдаев // Сб. трудов V Международной научно-практической конференции. Т. 1. «Инновационные технологии и экономика в машиностроении». – Югра, 2014. – С. 62-67.
- [17] Володин, В.Я. Создаём современные сварочные аппараты / В.Я. Володин. – М.: ДМК Пресс, 2011. – 352 с.
- [18] Хайнеман, Р. Визуальное моделирование электронных схем в *PSPICE*: Пер. с нем. / Р. Хайнеман. – М.: ДМК Пресс, 2008. – 336 с.
- [19] Амелина, М.А. Программа схемотехнического моделирования *MicroCap 8* / М.А. Амелина, С.А. Амелин. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 464 с.
- [20] Бардин, В.М. Исследование динамических свойств сварочного инвертора / В.М. Бардин, А.В. Земсков. – <http://fetmag.mrsu.ru/2010-2/pdf/WildingInvertor.pdf>
- [21] Бардин, В.М. Динамика переходных процессов в сварочных инверторах / В.М. Бардин, Д.А. Борисов, А.В. Земсков // Практическая силовая электроника. – 2012. – №3. – С. 52-55.
- [22] Бардин, В.М. Моделирование переходных процессов в сварочном инверторе / В.М. Бардин, Д.А. Борисов // Электротехника, 2009. – №6. – С. 47-49.
- [23] Бардин, В.М. Высокочастотные инверторы для сварки на переменном токе / В.М. Бардин, А.В. Земсков. – М.: ДМК Пресс, 2015. – 144 с.
- [24] Швайченко, В.Б. Напівпровідниковий зварювальний інвертор потужністю 2 кВт з поліпшеною електромагнітною сумісністю / В.Б. Швайченко, Д.В. Дикий // Технології та дизайн. – 2017. – №3(24). – С. 1-19.
- [25] Борисов, Д.А. Переходные процессы в сварочном инверторе / Д.А. Борисов, В.М. Бардин // Современная электроника. – 2010. – №2. – С. 52-53.
- [26] Хернитер, Марк Е. *Multisim*. Современная система компьютерного моделирования и анализа схем электронных устройств / Марк Е. Хернитер. – М.: ДМК-пресс, 2006. – 488 с.
- [27] Лурье, М.С. Имитационное моделирование схем преобразовательной техники / М.С. Лурье, О.М. Лурье. – Красноярск: СибГТУ, 2007. – 138 с.
- [28] Кирина, М. Программа схемотехнического моделирования *Multisim* / М. Кирина, К. Фомина. – 33 с. – Режим доступа [http://ikit.edu.sfu-kras.ru/CP\\_Electronics/pages/soft/multisim](http://ikit.edu.sfu-kras.ru/CP_Electronics/pages/soft/multisim)
- [29] Горбунов, А.С. Исследование транзисторного инвертора напряжения для питания индуктора с магнитопроводом в программе *MATLAB* / А.С. Горбунов // Научно-практические исследования. – 2020. – №2-1 (25). – С. 27-31.
- [30] Крампит, М.А. Особенности схемотехнического моделирования источников питания для сварки / М.А. Крампит // Обработка материалов: современные проблемы и пути решения: сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, 26-28 ноября 2015 г., г. Юрга. — Томск: Изд-во ТПУ, 2015. – С. 165-168.
- [31] Болотов, С.В. Информационно-измерительный комплекс для исследования процессов плавления и переноса электродного металла при дуговой сварке / С.В. Болотов, А.В. Хомченко, А.В. Шульга, Е.Л. Болотова // Вестник Брянского государственного технического университета. – № 6 (91). – 2020. – С. 4-11.
- [32] Джендубаев, А.-З.Р. Моделирование сварочного инвертора в системе *MATLAB* и его расширении *SimPowerSystems* без учета обратных связей / А.-З.Р. Джендубаев, Э.А.-З Джендубаев // Известия СевКавГГТА. – 2016. – №2. – С. 3-7.
- [33] Сараев, Ю.Н. Комплекс для исследования процессов дуговой сварки / Ю.Н. Сараев, А.Г. Лунёв, А.С. Киселёв и др. // Автоматическая сварка. – 2018. – №8. – С. 15-24.
- [34] Казаринов, Л.С. Моделирование стабилизатора тока светоизлучающих диодов в пакете *VisSim* / Л.С. Казаринов, Дж.А. Саид [текст] // Вестник ЮУрГУ. – Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2017. – Т. 17. – №1. – С. 146-152.

[35] Герман-Галкин С.Г. *Matlab & Simulink*. Проектирование мехатронных систем на ПК / С.Г. Герман-Галкин. – СПб.: Корона-Век, 2008. – 368 с.

[36] Чернышов, Н.Г. Моделирование и анализ схем в *Electronics Workbench*: Учебно-методическое пособие. / Н.Г. Чернышов, Т.И. Чернышова. – Тамбов: ТГТУ, 2005. – 52 с.

[37] Мухин, В.Ф. Моделирование электрических схем маломощных сварочных выпрямителей /

В.Ф. Мухин, Е.Н. Ерёмин // Омский научный вестник: Машиностроение и машиноведение. – 2011. – №3(103). – С. 73-78.

[38] Милютин, В.С. Источники питания для сварки: Учебное пособие / В.С. Милютин, В.А. Коротков. – Челябинск: Металлургия Урала. – 1999. – 368 с.

Стаття надійшла до редакції 10.08.2021

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СХЕМ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ СВАРОЧНОЙ ДУГИ В *MATLAB / SIMULINK*

**ВЕРЕЩАГО Е.Н.** канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры морского приборостроения, Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, г. Николаев, Украина, e-mail: venmkua@gmail.com;

**КОСТЮЧЕНКО В.И.** канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры судовых электроэнергетических систем, Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, г. Николаев, Украина, e-mail: vikmkua@gmail.com;

**Цель работы.** Создание виртуальных блоков и имитационных лабораторных стендов для изучения и всестороннего исследования динамических свойств сварочных источников питания.

**Методы исследования.** Обзор литературных источников по тематике, имитационное моделирование электромагнитных процессов в программной среде *MATLAB*, сравнительный анализ полученных и имеющихся данных.

**Полученные результаты.** Проведен сравнительный анализ средств моделирования источников питания сварочной дуги. Одним из основных параметров, по которым сравнивались среды, есть функциональные возможности. Из рассматриваемых симуляторов наиболее эффективным при моделировании рассматриваемых систем является *Simulink* программной среды *MATLAB*. Используя специальные возможности ее пользователь может не только имитировать, но и анализировать работу установки во времени.

Построены математические и функциональные модели источников питания сварочной дуги с применением элементов *SimPowerSystems* и блоков из библиотеки *Simulink* с привлечением самой системы *MATLAB*, что существенно расширяет возможности для моделирования таких систем. Математизация тех или иных процессов в некоторой степени показывает и уровень достоверности полученных результатов и степень их научной отработки. Разработанные модели выполняют роль лаборатории, позволяющей задавать и исследовать любые режимы и характеристики.

Представлены многочисленные эксперименты и сравнительный анализ численного и натурального экспериментов. Экспериментальная проверка полученных результатов на конкретных примерах показала актуальность поставленной задачи и корректность ее решения.

Дальнейшие исследования связаны с расширением круга моделируемых источников электропитания электрической дуги, всесторонним исследованием их динамических свойств и основных характеристик, с экспериментальной проверкой разработанных моделей, а также со сравнительным анализом и формированием рекомендаций по совершенствованию моделей.

**Научная новизна.** Получил дальнейшее развитие метод схмотехнического моделирования электрических и электронных схем общего назначения путем распространения его на новый класс объектов - системы электропитания электротехнологических установок.

**Практическая ценность.** Построение математических и функциональных моделей сложных систем с привлечением *MATLAB* позволяет учитывать их основные особенности, существенно расширяет возможности для моделирования, изучения и исследования источников питания. На основе предложенного подхода были разработаны и построены имитационные лабораторные стенды конкретных источников питания, позволяющие задавать и исследовать их любые режимы и характеристики.

**Ключевые слова:** схмотехническое моделирование; источник питания; анализ; экспериментальная проверка.

## MODELING OF WELDING ARC POWER SUPPLY DIAGRAMS IN MATLAB / SIMULINK

- VERESHCHAGO E.N. PhD, Associate Professor of the Department of Marine Instrument, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: venmkua@gmail.com;
- KOSTIUCHENKO V.I. PhD, Associate Professor of the Department of Marine Electric Power Systems, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: vikmkua@gmail.com;

**Purpose.** Creation of virtual blocks and simulation laboratory stands for the study and comprehensive research of the dynamic properties of welding power supplies.

**Methodology.** Review of literary sources on the subject, simulation modeling of electromagnetic processes in the MATLAB software environment, comparative analysis of obtained and available data.

**Findings.** The comparative analysis of means of modeling of power sources of a welding arc is executed. One of the main parameters by which the environments were compared is functionality. Among the considered simulators, Simulink of the MATLAB software environment is the most effective one in the considered systems modeling. Using special features, its user can not only simulate, but also analyze the operation of the over time installation.

Mathematical and functional models of welding arc power supplies were built using SimPowerSystems elements and blocks from the Simulink library with the involvement of the MATLAB system itself, which significantly expands the possibilities for such systems modeling. Mathematization of certain processes to some extent shows the level of reliability of the results and the degree of their scientific development. The developed models act as a laboratory, which allows you to set and explore any modes and characteristics.

Numerical experiments and comparative analysis of numerical and field experiments are given. Experimental verification of the obtained results on specific examples showed the relevance of the problem and the correctness of its solution.

Further research is related to the expansion of the range of simulated power sources of the electric arc, a comprehensive study of their dynamic properties and basic characteristics, experimental verification of the developed models, as well as comparative analysis and development of recommendations for model improvement.

**Originality.** The method of circuit modeling of general-purpose electrical and electronic circuits was further developed by extending it to a new class of objects - the power supply system of electrical installations.

**Practical value.** Construction of mathematical and functional models of complex systems with the involvement of MATLAB allows to take into account their main features, significantly expands the possibilities for modeling, study and research of power supplies. Based on the proposed approach, simulation laboratory stands of specific power supplies were developed and built, which allow to set and study any modes and characteristics.

**Keywords:** circuit modeling; power supply; analysis; experimental verification.

### REFERENCES

- [1] Il'jashhenko, D.P. (2017). Vlijanie jenergeticheskikh parametrov invertornykh istochnikov pitaniya na strukturu i svojstva neraz#jomnykh soedinenij pri ruchnoj dugovoj svarke: avtoref. dis. kand. tehn. nauk. Tomsk, FGBUN, 19.
- [2] Bolotovskij, Ju.I., Tanazly, G.I. (2006). Nekotorye aspekty modelirovaniya sistem silovoj jelektroniki [Some Aspects of Modeling Power Electronics Systems]. *Power electronics*, 4, 78-83. (in Russian.)
- [3] Bolotovskij, Ju.I., Tanazly, G.I. (2010). ORCAD 9.x, ORCAD 10.x. Praktika modelirovaniya. M.: SOLON-PRESS, 208.
- [4] Volodin, V.Ja. (2008). Sovremennye svarochnye aparaty svoimi rukami. SPb.: Nauka i tehnika, 304.
- [5] Volovich, G.I. (2005). Modelirovanie odnotaknykh DC/DC-preobrazovatelej v pakete VisSim [Simulation of single-cycle DC / DC converters in VisSim package]. *Modern electronics*, 3, 56-61. (in Russian.)
- [6] Klinachjov, N.V. (2001). Modelirovanie sistem v programme VisSim. Spravochnaja sistema. Cheljabinsk: JuUrGU, 174.
- [7] Volodin, V.Ja. (2014). Prodvinutye istochniki svarochnogo toka [Advanced welding current sources]. *Power electronics*, 4, 82-90. (in Russian.)
- [8] Krampit, M.A., Zernin E.A. (2014). Raschjoty jelektronnyh shem istochnikov pitaniya dlja svarki v programme LTSpice IV. Aktual'nye problemy sovremennogo mashinostroeniya: sbornik Trudov Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii, g. Jugra, 11-12 dekabrya 2014. Tomsk: Izd-vo TPU, 372-376.
- [9] Ul'janova, O.V. (2006). Informacionno-izmeritel'naja sistema dlja attestacii istochnikov pitaniya dugovoj svarki na osnove parametrov Markovskoj modeli processa plavleniya: avtoref. dis. kand. tehn. Nauk. Volgograd: Volgogradskij gosudarstvennyj tehnikeskij universitet, 17. (in Russian.)
- [10] Kazarinov, L.S., Vstavskaja, E.V., Said, Dzh.A. (2017). Issledovanie processov v mnogokanal'nykh stabilizatorah toka svetozluchajushhih diodov na osnove modelirovanij [Research of processes in multichannel current stabilizers of light-emitting diodes based on simulation]. *Energy problems*, T.19, 3-4, 168-175. (in Russian.)
- [11] Babkov, A.V., Iljuhin, A.V., Kolbasin, A.M., Seleznev, V.S. (2015). Laboratornyj praktikum po kursu «Modelirovanie sistem». M.: MADI, 64.
- [12] Karpov, A.V., Kalabanov, S.A., Shagiev, R.I. (2013).



- Sovremennye programmnye sredstva strukturno-funkcional'nogo i shemotekhnicheskogo modelirovaniya, Kazan': Kazan. un-t, 36.
- [13] Solov'jov, V.A. (2015). Modelirovanie v srede NI Multisim ponizhajushhego impul'snogo reguljatora postojannogo toka [NI Multisim Simulation of a DC Buck Down Regulator]. *Almanac of modern science and education*, 7(97), 120-125. (in Russian.)
- [14] Tatujko, P.S., Vlasov, A.I. (2017). Modelirovanie perehodnyh processov polumostovogo rezonansnogo preobrazovatelja v MATLAB SIMULINK. SAPR i modelirovanie v sovremennoj jelektronike: sb. nauchn. tr. I Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii. Brjansk: BGTU, 37-40.
- [15] Kubov, V.I. (2015). Issledovanie shem impul'snyh istochnikov pitaniya v SwCAD / Ltspice. K.: MK-PRESS, SPb.: KORONA-VEK, 208.
- [16] Negoda, E.N., Taran, A.P., Judaev, P.B. (2014). Sravnitel'nyj analiz istochnikov pitaniya svarochnoj dugi. Sb. trudov V Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii. T.1. «Innovacionnye tehnologii i jekonomika v mashinostroenii». Jugra, 62-67.
- [17] Volodin, V.Ja. (2011). Sozdajom sovremennye svarochnye apparaty. M.: DMK Press, 352.
- [18] Hajneman, R. (2008). Vizual'noe modelirovanie jelektronnyh shem v PSPICE: Per. s nem. M.:DMK Press, 336.
- [19] Amelina, M.A., Amelin, S.A. (2007). Programma shemotekhnicheskogo modelirovaniya MicroCap 8. M.: Gorjachaja linija – Telekom, 464.
- [20] Bardin, V.M., Zemskov, A.V. (2010). Issledovanie dinamicheskikh svojstv svarochnogo invertora. <http://fetmag.mrsu.ru/2010-2/pdf/WildingInvertor.pdf>
- [21] Bardin, V.M., Borisov, D.A., Zemskov, A.V. (2012). Dinamika perehodnyh processov v svarochnyh invertorah [Dynamics of transient processes in welding inverters]. *Practical power electronics*, 3, 52-55. (in Russian.)
- [22] Bardin, V.M., Borisov, D.A. (2009). Modelirovanie perehodnyh processov v svarochnom invertore [Simulation of transient processes in a welding inverter]. *Electrical engineering*, 6, 47-49. (in Russian.)
- [23] Bardin, V.M., Zemskov, A.V. (2015). Vysokochastotnye inventory dlja svarki na peremennom toke. M.: DMK Press, 144.
- [24] Shvajchenko, V.B., Dikij, D.V. (2017). Napivprovidnikovij zvarjuval'nij invertor potuzhnistju 2 kVt z polipshenoju elektromagnitnoju sumisnistju [Semiconductor welding inverter with a capacity of 2 kW with improved electromagnetic compatibility]. *Technology and design*, 3(24), 1-19. (in Ukrainian).
- [25] Borisov, D.A., Bardin, V.M. (2010). Perehodnye processy v svarochnom invertore [Transient processes in the welding inverter]. *Modern electronics*, 2, 52-53. (in Russian.)
- [26] Herniter, Mark E. (2006). Multisim. Sovremennaja sistema komp'juternogo modelirovaniya i analiza shem jelektronnyh ustrojstv. M.: DMK-press, 488.
- [27] Lur'e, M.S., Lur'e, O.M. (2007). Imitacionnoe modelirovanie shem preobrazovatel'noj tehniki. Krasnojarsk: SibGTU, 138.
- [28] Kirina, M., Fomina, K. Programma shemotekhnicheskogo modelirovaniya Multisim. [http://ikit.edu.sfu-kras.ru/CP\\_Electronics/pages/soft/multisim](http://ikit.edu.sfu-kras.ru/CP_Electronics/pages/soft/multisim)
- [29] Gorbunov, A.S. (2020). Issledovanie tranzistornogo invertora naprjazhenija dlja pitaniya induktora s magnitprovodom v programme MATLAB [Investigation of a transistor voltage inverter for powering an inductor with a magnetic core in the MATLAB program]. *Scientific and practical research*, 2-1 (25), 27-31. (in Russian.)
- [30] Krampit, M.A. (2015). Osobennosti shemotekhnicheskogo modelirovaniya istochnikov pitaniya dlja svarki. Obrabotka materialov: sovremennye problemy i puti reshenija: sbornik trudov Vserossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii molodyh uchenyh, aspirantov i studentov, 26-28 nojabrja 2015, g. Jurga. Tomsk: Izd-vo TPU, 165-168.
- [31] Bolotov, S.V., Homchenko, A.V., Shul'ga, A.V., Bolotova, E.L. (2020). Informacionno-izmeritel'nyj kompleks dlja issledovanija processov plavljenija i perenosa jelektrodnogo metalla pri dugovoj svarke [Information-measuring complex for studying the processes of melting and transfer of electrode metal in arc welding]. *Bulletin of the Bryansk State Technical University*, 6 (91), 4-11. (in Russian.)
- [32] Dzhendubaev, A.-Z.R., Dzhendubaev, Je.A.-Z. (2016). Modelirovanie svarochnogo invertora v sisteme MATLAB i ego rasshirenii SimPowerSystems bez ucheta obratnyh svjazej [Simulation of a welding inverter in MATLAB and its SimPowerSystems extension without taking feedbacks into account]. *Izvestiya SevKavGGTA*, 2, 3-7. (in Russian.)
- [33] Saraev, Ju.N., Lunjov, A.G., Kisel'jov, A.S. (2018). Kompleks dlja issledovanija processov dugovoj svarki [Complex for research of arc welding processes]. *Automatic welding*, 8, 15-24. (in Russian.)
- [34] Kazarinov, L.S., Said, Dzh.A. (2017). Modelirovanie stabilizatora toka svetoizluchajushchih diodov v pakete VisSim [Simulation of the current stabilizer of light-emitting diodes in the VisSim package]. *Bulletin of SUSU. Series "Computer technologies, control, radio electronics"*. T.17, 1, 146-152. (in Russian.)
- [35] German-Galkin, S.G. (2008). Matlab & Simulink. Proektirovanie mehatronnyh sistem na PK. SPb.: Korona-Vek, 368.
- [36] Chernyshov, N.G., Chernyshova, T.I. (2005). Modelirovanie i analiz shem v Electronics Workbench. Tambov: TGTU, 52.
- [37] Muhin, V.F., Erjomin, E.N. (2011). Modelirovanie jelektricheskikh shem malomoshnyh svarochnyh vyprjamitelej [Simulation of electrical circuits of low-power welding rectifiers]. *Omsk Scientific Bulletin: Mechanical Engineering and Engineering Science*, 3(103), 73-78. (in Russian.)
- [38] Miljutin, V.S., Korotkov, V.A. (1999). Istochniki pitaniya dlja svarki: Uchebnoe posobie. Cheljabinsk: Metallurgija Urala, 368 s.



УДК 621.023.03

## ФІЗИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НЕСТАЦІОНАРНИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ У СИЛОВОМУ ТРАНСФОРМАТОРІ ПРИ РІЗКОЗМІННИХ НАВАНТАЖЕННЯХ

- ЗІНОВКІН В.В.** д-р техн. наук, професор, професор кафедри електропривода та автоматизації промислових установок національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: znvvv@ukr.net;
- БЛИЗНЯКОВ О.В.** канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електричних та електронних апаратів національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: blizn1953@gmail.com;
- КРИСАН Ю. О.** канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електропривода та автоматизації промислових установок національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: krisan@mail.com;
- ЗАЛУЖНИЙ М.Ю.** ст. викладач кафедри електропривода та автоматизації промислових установок національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: zaluzhnyi\_m@ukr.net.

**Мета роботи.** Розробити і експериментально підтвердити методика фізичного моделювання нестационарних електромагнітних процесів в потужному силовому трансформаторі, що функціонує при різкозмінних навантаженнях, шляхом поєднання критеріїв подоби та коефіцієнтів еквівалентності.

**Методи дослідження.** При проведенні досліджень використовувались теоретичні положення математичного та комп'ютерного моделювання, теоретичної електротехніки, а також теорія експерименту з застосуванням коефіцієнтів еквівалентності.

**Отримані результати.** Розроблені методи експериментального дослідження, які містять формування та реєстрацію сукупності зовнішніх та внутрішніх параметрів фізичних моделей, макетних зразків та реального обладнання. Отримано критерії подібності нестационарних електромагнітних процесів, що збуджуються різкозмінними полями розсіювання у силових трансформаторах спеціального призначення.

**Наукова новизна.** Подальшого розвитку отримала теорія та практика фізичного моделювання, а також теорія подібності нестационарних електромагнітних процесів у силових трансформаторах спеціального призначення, та формування сукупності характерних рис випробувальних режимів та їх реєстрації.

**Практична цінність.** Впровадження фізичного моделювання нестационарних електромагнітних процесів на стадіях проектування та виготовлення силових трансформаторів для систем електропостачання дугових сталеплавильних печей, приводів прокатних станів та ін., а також при модернізації силових трансформаторів загального призначення.

**Ключові слова:** фізичне моделювання; нестационарні електромагнітні процеси; трансформаторне обладнання; різкозмінні навантаження; надійність; аварійність; критерії подібності; коефіцієнт еквівалентності.

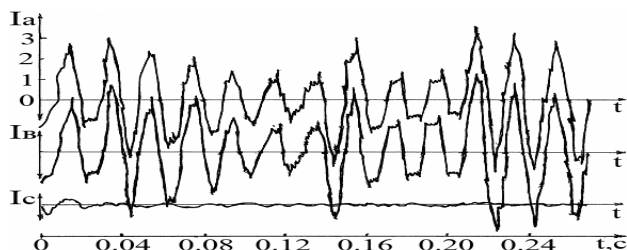
### І. ВСТУП

Нестационарні електромагнітні процеси мають місце в електротехнічному обладнанні, яке працює в системах електропостачання енергоємних технологічних комплексів. Останні характеризуються різкозмінними електротехнологічними режимами, які у часі змінюються за імовірнісним законом і, в значній мірі, залежать від особливостей того чи іншого технологічного процесу [4], [6], [9], [10], [14], [15]. Проблема полягає в тому, що на стадії проектування електричного обладнання використовувались інженерні методики, які відповідають вимогам нормативно-технічної документації (технічних умов, державних та міжнародних стандартів) переважно для обладнання загального призначення. При цьому не враховувалось, що е-

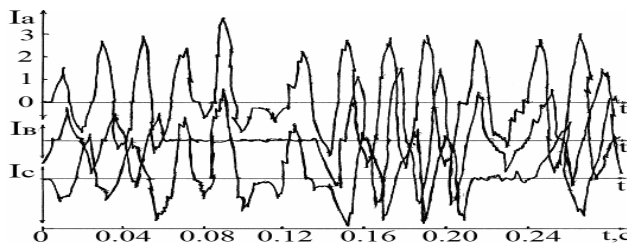
лектродинамічні зусилля і додаткові втрати зростають до 53 і 42%, відповідно, у порівнянні з системами загального призначення. Це, звичайно, призводить до підвищення аварійності в енергоємних електротехнологічних комплексах (ЕТК). Так, наприклад, аварійність трансформаторного обладнання, що забезпечує живлення дугових сталеплавильних печей, приводів прокатних станів, ліній і вставок постійного струму, сягає 60%. Отже, існує гостра необхідність дослідити вплив таких факторів на функціонування електричного обладнання, на їх основі, розробити інженерно-технічні рішення для зниження додаткових втрат, перегрівів та електродинамічних зусиль до нормованих рівнів, а також уникнення ферорезонансних явищ.

Коротко розглянемо основні показники електри-

чно навантаження трансформаторного обладнання, яке забезпечує живлення енергоємного сталеплавильного комплексу. Як приклад, на рисунках 1 та 2 надані осцилограми струмів в процесі технологічного короткого замикання у сталеплавильному комплексі у складі ДСП-100. Величини струмів надані кратністю по відношенні до номінального струму.



**Рисунок 1.** Осцилограми струмів на низькій стороні мережевого трансформатора типової потужності 160 МВА при роботі ЕТК у складі ДСП-100 в режимі двофазного технологічного короткого замикання



**Рисунок 2.** Осцилограми струмів на низькій стороні мережевого трансформатора типової потужності 160 МВА при роботі ЕТК у складі ДСП-100 в режимі почергових двофазних та трифазних технологічних коротких замикань

З рисунків 1 та 2 видно, що струми мають суттєво несинусоїдальний та несиметричний (до трифазної системи) характер. При цьому мають місце почергові трифазні та двофазні технологічні короткі замикання з відповідними перехідними процесами. Зокрема, на осцилограмі, яка надана на рис. 2, видно, що з початку має місце трифазне коротке замикання, потім між

фазами "А" і "С", потім – трифазне, потім між фазами "А" і "В", а в подальшому знов трифазне.

Такий характер навантаження трансформатора має місце протягом технологічної фази «розплав». Він в значній мірі залежить від якості скрапу, технологічних факторів, а також вибору режиму роботи лічного трансформатора. Останнє призводить до виникнення і розвитку нестационарних та несиметричних електродинамічних і електромагнітних явищ в обмотках, магнітній системі й конструкції у цілому. Очевидно, що у таких режимах деталі конструкції кожної з фаз функціонують в нерівнозначних електромагнітних та електродинамічних умовах, що є причиною часткового розпресування й усадки ізоляції з подальшою втратою електродинамічної стійкості обмоток [2]. Це є одним з численних факторів, що призводить до підвищення аварійності та зниження надійності трансформаторного обладнання.

Слід зазначити, що в таких режимах мають місце вищі гармонійні, пульсуючі і постійні складові, які впливають на електромагнітні процеси трансформатора: поверхневі втрати, електродинамічні, термічні і ферорезонансні явища, надмірне збудження в окремих стрижнях магнітопроводу, утворення зрівняльних струмів в деталях і вузлах устаткування, складним перехідним процесам в системах електропостачання, відхиленню струмів у суміжних розподільних мережах 10 кВ до 50% і т.д. З технологічної точки зору такі процеси обумовлені «обвалами» шихти, поломками і вигоранням електродів, обривами і замиканнями в коротких мережах, рухом розплавленого металу і шлаку, переміщеннями дуги при зміні напруженості магнітного поля [3], [4], [6], [9], [15], [18], [19].

Отже, різкозмінний характер навантаження викликає нестационарні електромагнітні процеси, які роблять експлуатацію електротехнічного обладнання, і особливо трансформаторів, більш жорсткою та скорочують термін їх служби. Як приклад, в табл. 1 надані систематизовані результати дослідження аварійності трансформаторного обладнання при різкозмінних навантаженнях.

**Таблиця 1.** Аварійність трансформаторного обладнання в результаті пошкодження активних і неактивних елементів конструкції

Елементи конструкції	Клас напруги, кВ													
	35		110		220		330		500		750		Всього	
	Кількість	%	Кількість	%	Кількість	%	Кількість	%	Кількість	%	Кількість	%	Кількість	%
Обмотки	61	30	43	13	10	7	1	8	0	0	0	0	115	16
Пристрій РПН	4	2	61	18	26	19	1	8	5	24	0	0	97	13,5
Вводи	27	13	77	23	44	32	3	23	7	34	0	0	158	22
Інші вузли	81/31	40/15	126/31	37/9	55/1	41/1	8/0	61/0	9/0	42/0	0/0	0/0	279/0	39,5/9
Усього	204	100	338	100	136	100	13	100	21	100	0	0	712	100

Табл. 1 дає наглядну уяву про аварійність транс-

форматорного обладнання в мережах. Зокрема, найбільша аварійність має місце в системах електропоста-

чанья 35, 110 і 220 кВ, що пояснюється тим, що ці системи використовуються для живлення дугових сталеплавильних печей, приводів прокатних станів, інших енергоємних промислових підприємств і установок з різкозмінним характером навантаження.

## II. АНАЛІЗ ПУБЛІКАЦІЙ

Існуючі методи моделювання нестационарних електромагнітних процесів в елементах електротехнічного обладнання, збуджених різкомінними струмами, не дозволяють у повній мірі дослідити взаємозв'язок між електромагнітними полями розсіювання, додатковими втратами в деталях, електродинамічними зусиллями і іншими параметрами [1], [2], [5], [7], [11]–[15], [18], [19]. Для вирішення інженерних завдань на стадії проектування трансформаторного обладнання використовуються відповідні математичні та комп'ютерні моделі, напівпровідні та електролітичні ванни, відповідні керівні технічні матеріали та комбінаційні. Кожному з цих методів притаманні свої переваги і недоліки. Вони дозволяють встановити взаємні зв'язки між додатковими втратами по відомим епюрам розподілу полів розсіювання та іншими параметрами. При різкозмінних навантаженнях такі взаємозв'язки між окремими електромагнітними параметрами встановити неможливо внаслідок імовірнісної їх прояви. Тому для отримання достовірної інформації дослідження необхідно виконувати з урахуванням одночасної дії усіх факторів. Отже, найбільш повну та достовірну інформацію про хід нестационарних електромагнітних процесів і взаємних зв'язках між окремими параметрами можна отримати методом фізичного моделювання.

## III. МЕТА РОБОТИ

Метою цієї роботи є розробка та реалізація методики фізичного моделювання нестационарних електромагнітних процесів в електрообладнанні, які збуджуються різкозмінними електричними навантаженнями з використанням коефіцієнтів еквівалентності.

## IV. ФІЗИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

Фізичне моделювання доцільно використовувати при дослідженні електромагнітних процесів в електротехнічному обладнанні спеціального призначення. У даному випадку воно полягає в тому, що дослідження виконуються на зменшеній копії («фізичній моделі») електротехнічного обладнання спеціального призначення, що розробляється. При цьому її живлення здійснюється різкозмінними струмами, аналогічними за параметрами тим, що мають місце в реальному обладнанні («оригіналі») в процесі його експлуатації, а саме: ідентичний склад вищих гармонік, форма збуджуючого струму, а також їх діючі значення і частоти, які вибираються відповідно до визначальним критеріям подібності електромагнітних процесів. Живлення моделі здійснюється від спеціалізованого формувача різкозмінного навантаження і регульованої

частоти до 1000 Гц. [1]–[5]. Це дозволяє досліджувати нестационарні електромагнітні процеси при протіканні струму, який змінюється у часі за характерними ознаками реального електротехнологічного режиму. Результати досліджень, що отримані на фізичній моделі, приводяться до оригіналу на підставі критеріїв подібності відповідних параметрів. Збуджувальними є струми, що протікають в обмотках. Електромагнітне поле розсіювання пропорційне цим струмам. В якості початкових параметрів використовуємо напруженість магнітного поля розсіювання, яка розподіляється у фізичному об'ємі елементів електричного обладнання, включаючи неактивні деталі конструкції та допоміжні вузли. Напруженість магнітного поля розсіювання змінюється в часі по складному періодичному закону, який представимо в наступному вигляді:

$$H_{\xi}^{(o)}(\delta, t) = H^{(m)}(\delta, t) \cdot m_{\omega}^{-1} \cdot k_{\text{ор}} = H_{\xi}(\delta, t) \cdot m_{\omega}^{-1} \quad (1)$$

В загальному випадку несинусоїдальне магнітне поле оригіналу може бути надано у наступному вигляді:

$$H_{\xi}^{(o)}(\delta, t) = H_{\text{DC}}(\delta, t) + H_{\text{imp}}(\delta, t) + H_{\omega}(\delta, t) \quad (2)$$

де  $H_{\text{DC}}(\delta, t)$ ,  $H_{\text{imp}}(\delta, t)$  і  $H_{\omega}(\delta, t)$  – миттєві значення складових напруженості магнітного поля: постійна, імпульсна та синусоїдальна, відповідно;  $\delta$  – навантажувальний параметр, що визначає характер зміни поля;  $t$  – час;  $\omega$  – кутова частота першої гармоніки; індекси «o» і «m» позначають приналежність поля оригіналу і моделі відповідно;  $k_{\text{ор}}$  – коефіцієнт еквівалентності кутової частоти, що визначається за такою формулою [8]:

$$k_{\text{ор}} = \left( \sum_{v=1}^n v^{0,5} \cdot \gamma^2 \right)^{0,5}, \quad (3)$$

де  $v$  – порядковий номер гармоніки;  $\gamma$  – частковий внесок кожної гармоніки, що визначається за такою формулою:

$$\gamma = \frac{H_v}{H_{\Sigma}} \quad (4)$$

Формули (3) та (4) використовуються для визначення еквівалентної частоти:

$$\omega_{\text{екв}} = \omega_{\text{ном}} \cdot k_{\text{ор}} \Big|_{H_{\text{досл}} = H_{\text{ном}}}, \quad (5)$$

де  $\omega_{\text{ном}}$  – номінальна кутова частота;  $H_{\text{досл}}$  та  $H_{\text{ном}}$  – напруженість магнітного поля у досліді та у номінальному режимі, відповідно.

Ідентичність протікання електромагнітних процесів в моделі і оригіналі забезпечується дотриманням рівнянь Максвелла. Перше рівняння Максвелла у даному випадку має наступний вигляд:

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} H_{\xi}^{(o)}(\delta, t) &= \operatorname{rot} H_{\xi}^{(m)}(\delta, t) \cdot m_E \cdot m_H^{-1} = \\ &= \sigma H_{\xi}^{(m)}(\delta, t) m_E^{-1} m_{\sigma} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} H_{\xi}^{(o)}(\delta, t) &= \operatorname{rot} H_{\xi}^{(m)}(\delta, t) \cdot m_E \cdot m_H^{-1} = \\ \text{або} &= \left( \sigma H_{\xi}^{(m)}(\delta, t) + \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t} \right) m_E^{-1} m_H m_{\sigma} \end{aligned} \quad (6)$$

Оскільки неактивні деталі електроустаткування виготовлені з провідникових матеріалів (конструкційних сталей), то другим доданком в рівнянні в (6) нехтуємо. Для складної системи електротехнічного обладнання друге рівняння Максвелла можна записати в наступному вигляді:

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} H_{\xi}^{(o)}(\delta, t) &= \operatorname{rot} H_{\xi}^{(m)}(\delta, t) \cdot m_E \cdot m_H^{-1} = \\ &= -\mu \frac{\partial H_{\xi}^{(m)}(\delta, t)}{\partial t^{(m)}} m_t m_H^{-1} \end{aligned} \quad (7)$$

Рівняння (6) та (7) описують нестационарні процеси в моделі і оригіналі, а також відображають їх ідентичність і характер протікання в електротехнічному обладнанні.

У наданих рівняннях прийняті наступні позначення:

$$m_H = \frac{H^{(m)}(\delta, t)}{H^{(o)}(\delta, t)}; \quad m_E = \frac{E^{(m)}(\delta, t)}{E^{(o)}(\delta, t)} - \text{масштаб напруженості магнітного та електричного поля, відповідно;}$$

$$m_{\sigma} = \frac{\sigma^{(m)}}{\sigma^{(o)}}; \quad m_{\mu} = \frac{\mu^{(m)}}{\mu^{(o)}} - \text{масштаб електричної}$$

провідності та магнітної проникності неактивних елементів конструкції, відповідно;

$$m_{\omega} = \frac{\omega^{(m)}}{\omega^{(o)}}; \quad m_t = \frac{t^{(m)}}{t^{(o)}} - \text{масштаб кутової та ек-$$

вівалентної частоти, а також часу протікання електромагнітного процесу, відповідно.

У випадку, коли деталі конструкції моделі і оригіналу виготовлені з однакових матеріалів:

$$\mu^{(o)} = \mu^{(m)} = \text{const}, \quad \sigma^{(o)} = \sigma^{(m)} = \text{const}.$$

Для феромагнітних матеріалів необхідно врахувати нелінійність магнітної проникності [1, 2].

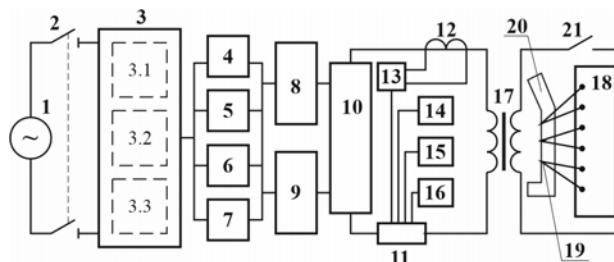
Виконавши відповідні перетворення, приходимо до критеріальним рівнянням подібності нестационарних електромагнітних процесів в моделі і оригіналі

$$\begin{aligned} (m_H m_E m_{\sigma}) m_{\omega} = 1 \\ (m_H m_E m_{\mu}) (m_{\omega} m_t) \end{aligned} \quad \text{або} \quad m_{\omega}^2 m_t^{-1} m_{\mu} m_{\sigma} = 1 \quad (8)$$

З визначального критерію подібності випливає, що при зменшенні фізичної моделі, частота струму збільшується згідно (8). При цьому слід зазначити, що

для фізичної моделі масштабна модель працює в області слабких магнітних полів, а в оригіналі – в області сильних. Це необхідно враховувати при приведенні результатів вимірювань на моделі до оригіналу [5].

Експериментальні дослідження виконувались на макетному зразку силового перетворювального трансформатора ОДЦНП-175000/±750. Вимірювання і реєстрація різкозмінних струмів та напруг здійснювалася відповідно до структурної схеми, яка надана на рис. 3.



**Рисунок 3.** Структурна схема спеціалізованого стенду для формування різкозмінних збуджуючих параметрів і моделювання електромагнітних процесів фізичної моделі

На рис.3 прийнято наступні позначення: 1 – генератор змінного струму регульованої частоти 50–800 Гц; 2 – вимикач; 3 – моделюючий блок; 3.1, 3.2, 3.3 – формувачі збуджуючого струму; 4 – регулятор несиметрії струму; 5 – регулятор потужності; 6 – вимірник напруги; 7 – аналізатор спектра й частотних характеристик; 8 – регулятор активної складової потужності; 9 – регулятор реактивної потужності; 10 – регулятор узгодження випробувального режиму та реєстрації; 11 – безіндуктивний шунт; 12 – трансформатор струму з розширеним діапазоном частот; 13 – реєстратор форми струму; 14 – реєстратор спектру і частотних характеристик; 15 – реєстратор несиметрії; 16 – реєстратор шуму та його спектрального складу; 17 – фізична модель; 18 – пристрій для вимірювання місцевих втрат та теплового перевантаження деталей конструкції; 19 – термопари; 20 – деталь моделі, що досліджується; 21 – короткозамикач.

Короткозамикач призначений для подачі напруги поштовхом і його відключення.

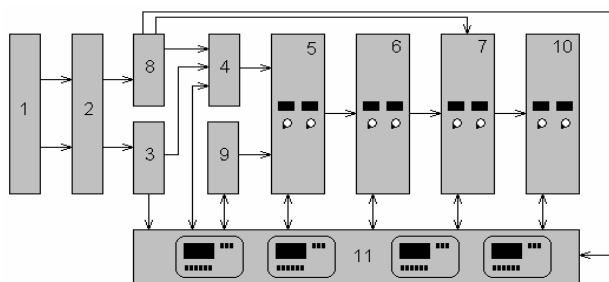
При цьому використовувалося спеціалізоване устаткування, зокрема формувач різкозмінного навантаження, а також методика досліджень сукупності параметрів, що характеризує нестационарні електромагнітні процеси [4]. Характерною особливістю цього пристрою є можливість відтворити форму намагнічувального струму моделі такої, як в оригіналі. Частота першої гармоніки в моделі визначається по критерію подібності (5). Слід зазначити, що в разі, коли деталі конструкції моделі, що випробовуються, та оригіналу виготовлені з однакових матеріалів, то у першому наближенні можна скористатися наступною рівністю:

$$m_{\omega}^2 m_t^{-1} = 1$$

У нашому випадку частота першої гармоніки струму в моделі дорівнювала 800 Гц, а в оригіналі (силовому трансформаторі спеціального призначення) – 50 Гц.

Позитивною властивістю наданого спеціалізованого стенду є можливість використовувати коефіцієнти еквівалентності і одночасно вимірювати зовнішні збуджуючі (струм, напругу, частоту, потужність та їх складові) і електромагнітні (поверхневі втрати, нагрів, потоків розсіювання, зрівняльних потоків, електродинамічних зусиль) параметри елементів випробуваного обладнання. При цьому вимірюються місцеві перегріву в найбільш вразливих місцях неактивних деталей з метою дослідження найбільш навантажених ділянок і розробки методів їх зниження до величин нормованих державними стандартами.

Класифікація і автоматизований аналіз кратності й тривалості збуджуючих струмів здійснювався за допомогою спеціалізованого пристрою, структурна схема якого наведена на рис. 4.

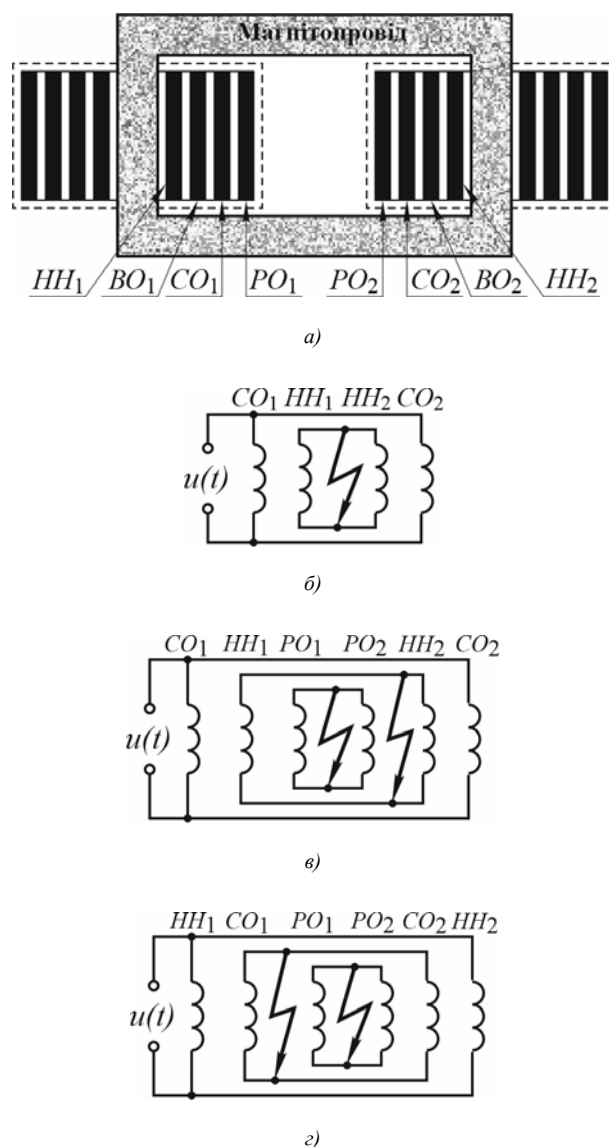


**Рисунок 4.** Структурна блок-схема спеціалізованого пристрою для вимірювання, реєстрації та класифікації різкозмінних струмів

На рис. 4 прийняті наступні позначення: 1 – вимірювальний трансформатор струму (при вимірюванні напруги використовується трансформатор напруги) з розширеним діапазоном частот або шунт чи інший прилад для вимірювання струму; 2 – перетворювач струму або піковий детектор; 3 – блок масштабування аналізованих сигналів, що перевищують припустимі нормативно-технічною документацією; 4 – аналогопорівняльний логічний блок; 5 – програмно-аналітичний блок; 6 – блок класифікації відповідно до кратності аналізованої інформації; 7 – блок класифікації по тривалості різкозмінних впливів; 8 – генератор тактових імпульсів; 9 – бібліотека нормованих сигналів відповідно до кратності, тривалості й кількості; 10 – блок зберігання логічної інформації; 11 – блок індикації й знімання обробленої інформації, включаючи сигналізацію й можливі пошкодження у пристрої.

Вимірювалися перегріву в найбільш характерних місцях та відповідних режимах для кожної деталі та вузла, що випробувались. Слід відзначити, що електромагнітне навантаження цих деталей та вузлів суттєво залежить від схеми з'єднання обмоток моделі. При

зміні схеми з'єднання обмоток суттєво змінюється епюри поля розсіювання в просторі моделі. Тому доцільно ретельно дослідити найбільш вразливі деталі з точки зору електромагнітного перевантаження і, в значній мірі, теплового. З цією метою використано модель трансформатора з магнітною системою на двох стрижнях. На кожному стрижні розташовано по чотири обмотки: низьковольтна (НН), вентиляльна (ВО), мережева (СО) і регульовальна (РО) в порядку геометричного розташування відносно стержнів як показано на рис.5а. Обмотки НН, СО і РО з'єднувались відповідно до схем, що надані на рис 5б, 5в та 5г, а вентиляльні обмотки працювали індивідуально відповідно до вимог технологічного навантаження.



**Рисунок 5.** Розташування обмоток на стрижнях моделі (а) та схеми підключення обмоток (б), (в) і (г)

Випробування виконувалися на масштабній моделі, а потім порівнювалися з вимірними на реальному трансформаторі, який працював на промислово-

му підприємстві та випробовувався в умовах заводу-виробника. При цьому, живлення здійснювалося струмом, що змінюється в часі за синусоїдальним і несинусоїдальним законам. Гармонійний склад неси-

нусоїдального струму в дослідах витримувався однаковим. Отримані результати експериментальних досліджень наведені в табл. 2.

**Таблиця 2.** Результати моделювання додаткових втрат в неактивних деталях силового трансформатора спеціального призначення

Деталі	Модель		Оригінал		Підвищення втрат, в.о.
			Нагрів, °С		
	Режим	Втрати, Вт/м <sup>2</sup>	Синусоїдальний	Несинусоїдальний (k <sub>в/г</sub> = 14%)	
Бак	1	6,35	64,0	72,1	1,13* 1,16
	2	11,3	113,0	129,6	1,15* 1,16
Балка	3	10,8	108,0	180,6	1,66* 1,71
Стрижень	4	12,5	125,0	148,0	1,18* 1,21
Пакет	4	9,81	98,0	110,5	1,13* 1,15

Примітки: \* – визначено по результатам експерименту

У режимі 1 випробування виконувалися при з'єднанні обмоток за схемою, що надана на рис. 5б при потужності 50 МВА. Випробування у режимі 2 виконувались за тією ж схемою, але при потужності 67 МВА. В обох випадках обмотка РО була закороченою; при цьому витримувались струми, що відповідали певному режиму короткого замикання. У випробувальних режимах 3 та 4 обмотки з'єднувалися за схемами, які надані на рис. 5в та 5г, відповідно. Після аналізу багаточисельних випробувань встановлено, що найбільш несприятливим є режим при прохідній потужності 67 МВА.

Як видно з результатів дослідження нагрів в неактивних деталях більше при різкозмінному навантаженні в баку на 12,6 і 14,7% в порівнянні з синусоїда-

льним струмом. При цьому, в стінці баку навпроти другого стрижня місцевий нагрів зменшується відносно обмоток першого і другого стрижнів. При різкозмінному струмі нагрів в обох випадках збільшився пропорційно. У пресувальній балці нагрів збільшився на 67,2%, а в стрижні і першому пакеті магнітної системи на 18,4% і 12,7%, відповідно. Це пояснюється перерозподілом зрівняльних потоків в магнітній системі викликаних несиметрією розподілу навантаження по стрижнях. Оскільки в окремих деталях перегрів перевищував нормовані величини, то подальші дослідження виконувалися з метою пошуку рішень їх зниження при збереженні механічної міцності. Результати таких досліджень наведені в табл. 3.

**Таблиця 3.** Результати експериментальних досліджень методів зниження додаткових втрат в неактивних деталях

Досліджувана модель	Засоби зі зниження додаткових втрат	Додаткові втрати, Вт/м <sup>2</sup>	
		синусоїдальний струм	несинусоїдальний струм (k <sub>в/г</sub> = 14%)
Полка консолі	Без поздовжніх розрізів	10,8	18,06
	Два розрізи	7,4	12,35
	П'ять розрізів	1,93	3,22
Пресувальна пластина першого пакету	Без поздовжніх розрізів	12,5	15,80
	Два розрізи	7,09	9,36
	П'ять розрізів	2,71	3,51

З результатів дослідження поверхневих втрат, наведених в табл. 3, видно, що застосування відповідних заходів з переривання контурів в полиці нижньої консолі і пресувальній пластині дозволяють істотно знизити нагрів і розробити відповідні технічні рекомендації. Зокрема, в полиці нижньої консолі при різній кількості поздовжніх розрізів поверхневі перегріви при несинусоїдній струмі збільшуються практично однаково (на 67,0; 66,9; 66,8%). У пресувальній пластині при таких же технічних рішеннях і однакових токах поверхневі втрати зростають на 26,4; 32,0 і

29,5%, відповідно при одному, двох і п'яти розрізах. Наведені розбіжності між результатами досліджень полки і пресувальної пластини пояснюються двома причинами. Перша полягає в тому, що полка консолі знаходиться навпроти каналу розсіювання електромагнітного поля. Друга – геометричні розміри полки консолі істотно перевищують розміри пресувальної пластини першого пакету магнітної системи.

При зміні потужності від 50 до 67 МВА питомі втрати, як при синусоїдальному, так і різкозмінному струмах зростають в 1,76 раз, в той час як співвідно-

шення потужностей становить 1,34. Враховуючі, що втрати потужності пропорційні квадрату напруженості магнітного поля, яка в свою чергу пропорційна збуджувальному струму, то зазначене відношення становить 1,328. При цьому похибка не перевищує 6%.

### В. ВИСНОВКИ

Систематизований аналіз отриманих результатів дозволяє сформулювати наступні науково-технічні висновки:

1. Метод фізичного моделювання нестационарних електромагнітних процесів дозволяє отримати більш повну інформацію про електромагнітні процеси, що протікають в електротехнічному обладнанні призначеному для живлення технологічних об'єктів з різкозмінним навантаженням та іншому обладнанні.

2. Фізичне моделювання у поєднанні з методами теорії подібності та еквівалентності нестационарних електромагнітних процесів дозволяє враховувати вплив вищих гармонік різкозмінного навантаження на місцеві перегриви з похибкою, яка не перевищує 6%, що задовольняє інженерній практиці і може ефективно використовуватися на стадіях модернізації електротехнічного обладнання загального та спеціального призначення при використанні в потужних електротехнологічних установках.

3. Для підвищення ефективності експериментального дослідження нестационарних електромагнітних процесів і відповідності їх реальним, необхідною умовою є одночасне вимірювання зовнішніх різкозмінних і відповідних їм внутрішніх електромагнітних параметрів, оскільки незначна різниця у збуджуючих параметрах призводить до суттєвої розбіжності в отриманих результатах.

4. Доцільно продовжити подальший розвиток фізичного моделювання з урахуванням умов формування зрівняльних потоків в магнітній системі при несиметрії збуджуючих трифазних струмів.

5. Наведені методи фізичного моделювання доцільно використовувати для отримання достовірної інформації для розробки комп'ютерних моделей нестационарних електромагнітних процесів при різкозмінних навантаженнях електромеханічних об'єктів спеціального призначення.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Веников В.А. Теория подобия и моделирования применительно к задачам электроэнергетики / В.А. Веников. – М.: Высшая школа, 1966. – 487 с.
- [2] Иванов-Смоленский А.В. Электромагнитные поля и процессы в электрических машинах и их физическое моделирование: монография / А.В. Иванов-Смоленский. – М.: Энергия. -1969. – 304 с.
- [3] Зиновкин В.В. Исследование поверхностных потерь в массивных конструкционных сталях при намагничивании резкопеременным и постоянным магнитными полями / В.В.Зиновкин // Праці ІЕД НАН України. Енергетика 200. – 2000. – С. 17–30.
- [4] Зиновкин В.В. Вероятностные параметры резкопеременных нагрузок энергоёмких электротехнологических комплексов / В.В. Зиновкин // Праці ІЕД НАН України. – 2005. – №1(10).– С. 136–144.
- [5] Зиновкин, В.В. Методика экспериментальных исследований физических процессов на моделях силового электрооборудования при резкопеременных токах / В.В.Зиновкин, В.В.Куш, М.Ю.Залужный // Доклады 4-й научно-технической конференции: «Метрология электрических измерений в электротехнике». РАО «ЕС России», ОАО «ВНИИЭ». М. 2004. – С. 264 – 268.
- [6] Gzarneski L. Comments on Active Power Flow and Energy Accounts in Electrical Systems with Non-sinusoidal Waveforms and Asymmetry / L. Gzarneski // IEEE Transactions on Power Delivery. – Vol. 11. – №3. – 1996. – pp. 1244–1250.
- [7] Zinovkin, V. Physical Simulation of Electromagnetic Phenomena in Transformer Equipment under Strongly Varying Loads / V. Zinovkin, O. Blyzniakov, J. Vasilieva // IEEE: International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES), November 15th–17th, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Ukraine, 2017. – pp. 312–315.
- [8] Zinovkin V. Determination of equivalent quantities of electromagnetic field in massive ferrous details of electric equipment under strongly varying loads / V. Zinovkin, O. Blyzniakov // Electrical Engineering and Power Engineering. – No. 4, 2018. – pp. 8–16. DOI:10.15588/1607-6761-2018-4-1
- [9] Mironov, Yu. M. Specific Features of Electric Arc Furnaces as Electric Energy Receivers / Yu. M. Mironov // Russian Metallurgy (Metally). – 2021, 703–708 (2021). <https://doi.org/10.1134/S0036029521060185>
- [10] Robinson B.C. Supply-voltage and current variations produced by a 60-ton 3-phase electric arc furnace / B.C. Robinson, A.I. Winder // Proceedings of the IEE – Part A: Power Engineering, Volume 105, Issue 22, p. 305–318. DOI:10.1049/pi-a.1958.0054
- [11] Brociek, W.; Grzywacz, T.; Wilanowicz, R. Propagation of higher harmonics of voltage and current in the power system at changing location of nonlinear load. In Proceedings of the 18th International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE), Kutna Hora, Czech Republic, 11–13 September 2017.
- [12] Albert, H. Propagation of disturbances as voltage fluctuations in transmission networks. Probl. Energeticii Reg. 2016/ H. Albert, N. Golovanov, L. Elefterescu // 2016. – pp. 48–54.
- [13] Lozynskyi, O.Y. Synthesis and analysis of arc furnace electrical mode control system on the basis of three-dimensional phase currents vector distribution / O.Y. Lozynskyi, A.O. Lozynskyi, Y.S. Paranchuk, R.Y. Paranchuk // Electr. Eng. Electromech. – 2019. – No 4. – pp. 26–34.



- [14] Liu, X. Simulation research on the influence of electric arc furnace nonlinear characteristics on power supply network / X. H. Liu, G. Zhao, J. J. Yu // Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering. – 2004. – pp. 34–38.
- [15] Mendis, S.R. Harmonics and transient overvoltage analyses in arc furnace power systems / S.R. Mendis, D.A. Gonzales // IEEE Transactions on Industry Applications, 28(2), 1992. – pp. 336–342.
- [16] Girgis, A.A. Measurement of the parameters of slowly time varying high frequency transients / A.A. Girgis, J. Qiu // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 38(6), 1989. – pp. 1057–1063.
- [17] EN 50160: 2010, Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems, 30-Jul-2010.
- [18] Koppikar, D. A. Evaluation of eddy losses due to high current leads in transformers / D. A. Koppikar, S. V. Kulkarni, S. A. Khaparde, S. K. Jha // Proceedings IEE – Science Measurement and Technology, Vol. 144, No. 1, 1997. – pp. 34–38.
- [19] Lefevre, A. 3-D computation of transformers overheating under nonlinear loads / A. Lefevre, L. Miegeville, J. Fouladgar, G. Olivier // IEEE Transactions on Magnetics. – Vol. 41. – No. 5, 2005. – pp. 1564–1567.

Стаття надійшла до редакції 16.08.2021

## ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В СИЛОВОМ ТРАНСФОРМАТОРЕ ПРИ РЕЗКОПЕРЕМЕННЫХ НАГРУЗКАХ

- ЗИНОВКИН В.В.** д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок национального университета «Запорожская политехника», Запорожье, Украина, e-mail: znvzv@ukr.net;
- БЛИЗНЯКОВ А.В.** канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры электрических и электронных аппаратов национального университета «Запорожская политехника», Запорожье, Украина, e-mail: blizn1953@gmail.com;
- КРИСАН Ю.О.** канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок национального университета «Запорожская политехника», Запорожье, Украина, e-mail: krisan@mail.com;
- ЗАЛУЖНЫЙ М.Ю.** ст. преподаватель кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок национального университета «Запорожская политехника», Запорожье, Украина, e-mail: zaluzhny\_m@ukr.net.

**Цель работы.** Разработать и экспериментально подтвердить методику физического моделирования нестационарных электромагнитных процессов в мощном силовом трансформаторе, функционирующем при резкопеременных нагрузках, путем сочетания критериев подобия и коэффициентов эквивалентности.

**Методы исследования.** При проведении исследований использовались теоретические положения математического и компьютерного моделирования, теоретической электротехники, а также теория эксперимента с применением коэффициентов эквивалентности.

**Полученные результаты.** Разработаны методы экспериментального исследования, включающие формирование и регистрацию совокупности внешних и внутренних параметров физических моделей, макетных образцов и реального оборудования. Получены критерии подобия нестационарных электромагнитных процессов, возбуждаемых резкопеременными полями рассеивания в силовых трансформаторах специального назначения.

**Научная новизна.** Дальнейшее развитие получила теория и практика физического моделирования, а также теория подобия нестационарных электромагнитных процессов в силовых трансформаторах специального назначения и формирования совокупности характерных черт испытательных режимов и их регистрации.

**Практическая ценность.** Внедрение физического моделирования нестационарных электромагнитных процессов на стадиях проектирования и изготовления силовых трансформаторов для систем электроснабжения дуговых сталеплавильных печей, приводов прокатных станков и др., а также при модернизации силовых трансформаторов общего назначения.

**Ключевые слова:** физическое моделирование; нестационарные электромагнитные процессы; трансформаторное оборудование; резкопеременные нагрузки; надежность; аварийность; критерии подобия; коэффициент эквивалентности



## PHYSICAL MODELING OF UNSTEADY ELECTROMAGNETIC PROCESSES IN POWER TRANSFORMER UNDER SHARP LOAD FLUCTUATIONS

- ZINOVKIN V.V. Sci.D, Professor, Professor of the electric drive and automation of industrial plants department of the Zaporozhye National Polytechnic University, Zaporozhye, Ukraine, e-mail: znvvv@ukr.net;
- BLYZNIAKOV O.V. Ph.D, Associate professor, Associate professor of the electric and electronic apparatus department of the Zaporozhye National Polytechnic University, Zaporozhye, Ukraine, e-mail: blizn1953@gmail.com;
- KRYSAN Yu.O. Ph.D, Associate professor, Associate professor of the electric drive and automation of industrial plants department of the Zaporozhye National Polytechnic University, Zaporozhye, Ukraine, e-mail: krisan@mail.com;
- ZALUZHNYI M.Yu. Senior Lecturer of the electric drive and automation of industrial plants department of the Zaporozhye National Polytechnic University, Zaporozhye, Ukraine, e-mail: zaluzhnyi\_m@ukr.net

**Purpose.** To develop and experimentally confirm the method of physical modeling of non-stationary electromagnetic processes in a powerful power transformer operating under variable loads by combining similarity criteria and equivalence coefficients.

**Methodology.** Theoretical provisions of mathematical and computer modeling, theoretical electrical engineering were used in the research, as well as the theory of experiment with the application of equivalence coefficients.

**Findings.** Methods of experimental research were developed, which include the formation and registration of a set of external and internal parameters of physical models, prototypes and real equipment. Criteria for similarity of non-stationary electromagnetic processes excited by sharply changing scattering fields in special purpose power transformers are obtained.

**Originality.** The theory and practice of physical modeling, as well as the similarity theory applied to unsteady electromagnetic processes in powerful transformer equipment for special purposes were further developed. A set of distinctive features of test conditions and their registration were formed.

**Practical value.** Application of physical modeling of unsteady electromagnetic processes at the design and manufacture stages of power transformers for power supply systems of electric arc furnaces, rolling mill drives, etc., as well as during the refinement of general-purpose power transformers.

**Keywords:** physical modeling; unsteady electromagnetic processes; power-intensive electrical equipment; sharp load.

### REFERENCES

- [1] Venikov V.A. (1966) Teorija podobija i modelirovanija primenitel'no k zadacham jelektrojenergetiki. M. Vysshaja shkola. 487.
- [2] Ivanov-Smolenskij, A.V. (1969). Jelektromagnitnyje polja i processy v jelektricheskijh mashinah i ih fizicheskoe modelirovanie: monografija. M. Jenergija. 304.
- [3] Zinovkin V.V. (2000). Issledovanie poverhnostnyh poter' v massivnyh konstrukcionnyh staljah pri namagnichivanii rezkoperemennym i postojannym magnitnymi poljami [Research of surface losses in massive structural steels under magnetization by sharply fluctuating and invariable magnetic fields]. *Praci IED NAN Ukraini. Energetika 200.* 17–30. (in Russian.)
- [4] Zinovkin V.V. (2005). Verojatnostnyje parametry rezkoperemennyh nagruzok jenergoemkijh jelektrotehnologicheskijh kompleksov [Probabilistic parameters of sharp load fluctuations of power-intensive electro-technological facilities]. *Praci IED NAN Ukraini.* 10. 136–144. (in Russian.)
- [5] Zinovkin, V.V., Kushh, V.V., Zaluzhnyj, M.Ju. (2004). Metodika jeksperimental'nyh issledovanij fizicheskijh processov na modeljah silovogo jelektrooborudovanija pri rezkoperemennyh tokah [Technique for experimental research of physical processes using models of power electrical equipment under sharp current fluctuations]. *Doklady 4-j nauchno-tehnicheskijh konferencii: «Metrologija jelektricheskijh izmerenij v jelektrotehnike».* RAO «ES Rossii», OAO «VNIIE». M. 2004. 264–268. (in Russian.)
- [6] Gzarmeski L. (1996) Comments on Active Power Flow and Energy Accounts in Electrical Systems with Non-sinusoidal Waveforms and Asymmetry. *IEEE Transactions on Power Delivery.* Vol. 11, No 3, 1244–1250.
- [7] Zinovkin, V. (2017). Physical Simulation of Electromagnetic Phenomena in Transformer Equipment under Strongly Varying Loads / V. Zinovkin, O. Blyzniakov, J. Vasilieva // IEEE: International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES), November 15th–17th, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University,

- Ukraine, 312–315.
- [8] Zinovkin, V., Blyzniakov, O. (2018). Determination of equivalent quantities of electromagnetic field in massive ferrous details of electric equipment under strongly varying loads. *Electrical Engineering and Power Engineering*. No. 4, 8–16. DOI:10.15588/1607-6761-2018-4-1
- [9] Mironov, Yu. M. (2021). Specific Features of Electric Arc Furnaces as Electric Energy Receivers. *Russian Metallurgy (Metally)*, 703–708. <https://doi.org/10.1134/S0036029521060185>
- [10] Robinson B.C. Supply-voltage and current variations produced by a 60-ton 3-phase electric arc furnace / B.C. Robinson, A.I. Winder // *Proceedings of the IEE – Part A: Power Engineering*, Vol. 105, Issue 22, 305–318. DOI:10.1049/pi-a.1958.0054
- [11] Brociek, W.; Grzywacz, T.; Wilanowicz, R. Propagation of higher harmonics of voltage and current in the power system at changing location of nonlinear load. In *Proceedings of the 18th International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE)*, Kutna Hora, Czech Republic, 11–13 September 2017.
- [12] Albert, H., Golovanov, N., Elefterescu, L. (2016) Propagation of disturbances as voltage fluctuations in transmission networks. *Probl. Energeticii Reg* 48–54.
- [13] Lozynskiy, O.Y., Lozynskiy, A.O., Paranchuk, Y.S., (2019). Synthesis and analysis of arc furnace electrical mode control system on the basis of three-dimensional phase currents vector distribution. *Electr. Eng. Electromech.* No 4, 26–34.
- [14] Liu, X. G. Zhao, J. J. Yu (2004). Simulation research on the influence of electric arc furnace nonlinear characteristics on power supply network. *Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering*. 34–38.
- [15] Mendis, S.R. Harmonics and transient overvoltage analyses in arc furnace power systems / S.R. Mendis, D.A. Gonzales // *IEEE Transactions on Industry Applications*, 28(2), 1992. – pp. 336–342.
- [16] Girgis, A.A. (1989). Measurement of the parameters of slowly time varying high frequency transients. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 38(6), 1057–1063.
- [17] EN 50160: 2010, Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems, 30-Jul-2010.
- [18] Koppikar, D. A., Kulkarni, S. V., Khaparde S. A., Jha S. K. (1997). Evaluation of eddy losses due to high current leads in transformers. *Proceedings IEE. Science Measurement and Technology*, Vol. 144, No. 1, 34–38.
- [19] Lefevre, A., Miegerville, L., Fouladgar, J., Olivier, G. (2005). 3-D computation of transformers overheating under nonlinear loads. *IEEE Transactions on Magnetics*. Vol. 41, No. 5, 1564–1567.

## ПИТОМІ НОРМИ ВИТРАТ ЕНЕРГІЇ В ЗАДАЧІ КОНТРОЛЮ ЕФЕКТИВНОСТІ ЇЇ ВИКОРИСТАННЯ

ДРЕШПАК Н.С.

канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електротехніки Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна, e-mail: dreshpak.n.s@nmu.one .

ДРЕШПАК О.С.

канд. техн. наук, доцент кафедри технологічного інжинірингу переробки матеріалів Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна, e-mail: dreshpak.o.s@nmu.one .

ВИПАНАСЕНКО С.І.

докт. техн. наук, професор, професор кафедри електроенергетики Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна, e-mail: vypanasenko.s.i@nmu.one .

**Мета роботи.** Аналіз існуючих методів нормування питомих витрат енергії та визначення методу, прийнятого для нормування показника енергоефективності при наявності швидкоплинних структурних і режимних змін в енергоспоживанні сучасного промислового підприємства.

**Методи дослідження.** Аналіз існуючих методів нормування питомих витрат енергії, визначення їх недоліків та переваг. Співставлення можливостей цих методів з вимогами до нормування показників питомого енергоспоживання в умовах сучасного виробництва.

**Отримані результати** Визначена необхідність підвищення точності розрахунку питомих норм витрат енергії в задачах контролю ефективності її використання. Це забезпечує чітке розмежування режимів «раціонального» та «нераціонального» використання енергоносіїв, сприяє об'єктивній оцінці вкладу в цей процес дій обслуговуючого персоналу підприємства. Проаналізовано існуючі методи розрахунку питомих норм. Визначена ступінь їх прийнятності для вирішення завдань нормування показників енергоспоживання в сучасних умовах виробництва. Показано, що точність розрахунку експериментальним методом висока при стабільних параметрах, що впливають на процес енергоспоживання. Розрахунково-аналітичний метод, як правило, не забезпечує низької похибки розрахунку, має значну трудомісткість, що обмежує його використання в умовах підвищеної оперативності контролю. В умовах контролю енергоспоживання, що характеризуються суттєвими структурними і режимними змінами, найбільш прийнятним є статистичний метод нормування, який характеризується порівняно низькими трудомісткістю та статистичною похибкою розрахунку, зумовленою застосуванням експериментальних даних. Розкриті переваги та недоліки методу. Можливість підвищення інформативності контролю слід пов'язувати з удосконаленням статистичної моделі. Розширення оперативної інформації, визначення інтегральних характеристик енергоспоживання сприяє формуванню раціональних управлінських рішень, забезпеченню високої енергоефективності процесу виробництва промислової продукції.

**Наукова новизна.** Вперше запропоновано використання статистичного методу нормування питомого споживання енергії в системі контролю енергоефективності виробничих процесів при швидкоплинних структурних та режимних змінах енергоспоживання об'єкту. Акцентовано увагу на суттєвій залежності показника достовірності результатів контролю енергоефективності виробничого процесу (наявності економії або перевитрат енергії) від точності розрахунку питомих норм витрат енергії. Визначена залежність оцінки діяльності колективу підприємства в сфері енергозбереження від досягнутої точності нормування енергоспоживання. Розкриті перспективи удосконалення методу в системі контролю енергоефективності.

**Практична цінність** полягає у визначенні прийнятого для умов сучасного промислового виробництва методу нормування питомих витрат енергії, а також шляхів його удосконалення.

**Ключові слова:** Контроль енергоефективності; статистичний метод, точність нормування; достовірність контролю.

### І. ВСТУП

Енергоефективне (раціональне) використання енергетичних ресурсів (у тому числі і електричної енергії) передбачає зменшення кількості спожитої енергії при виконанні технологічних процесів, пов'язаних з виробництвом продукції. Факт такого зменшення дозволяє вести мову про підвищення енергетичної ефективності, а збільшення свідчить про

протилежне. Наявність зміни витрат енергії на виконання процесу передбачає зіставлення фактичних значень витрат з нормованими значеннями, розрахунок яких виконується з урахуванням змін умов протікання технологічного процесу. Коректність зіставлення забезпечується порівнянням значень витрат енергії, віднесених до одиниці виробленої продукції (питомих витрат енергії). Зіставлення фактичних ви-

трат енергії з науково обґрунтованими нормами енергоспоживання дозволяє зробити висновок стосовно «раціонального» (або «нераціонального») використання енергоресурсів. Тому процедурі нормування питомих витрат енергії в процесі контролю енергоефективності приділяється особлива увага. При обґрунтуванні норм енергоспоживання слід урахувати як незмінні чинники, від яких залежить рівень спожитої енергії, так і такі, що змінюються в процесі виробництва продукції і визначення реальних значень яких є непростим завданням. В умовах ринкової економіки підприємство повинно постійно адаптуватися до змін зовнішнього середовища, забезпечувати конкурентоспроможність продукції [1]. Розвиток ринкових відносин сприяє розширенню номенклатури випуску продукції. Орієнтація виробництва на потреби споживача стимулює застосування нових технологій, покращення товарних показників продукції у короткі проміжки часу. Це є причиною швидкоплинних структурних і режимних змін в системі енергозабезпечення виробництва продукції. Очевидно, що такі зміни стосуються більшості сфер промислового виробництва. Тому прогнозування питомих витрат енергії в умовах, що безперервно змінюються, є актуальним напрямком досліджень. Виконання прогнозу нормованих значень питомого енергоспоживання потребує оцінки існуючих методів нормування з точки зору трудомісткості цього процесу, точності отриманих результатів, сфери їх застосування, існуючих недоліків та переваг.

## II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Слід зазначити, що дослідження в цій сфері виконувались і раніше [2]-[6], але діючі на той час методи нормування енергоспоживання стосувались виробництва в умовах планової економіки. Методи нормування були в основному орієнтовані на довготривалий випуск однотипної продукції з несуттєвими змінами в процесі її модернізації. Об'ємні розрахунки нормованих значень не сприяли оперативності контролю і своєчасному уведенню в дію управлінських рішень в сфері енергозбереження. Нормування здійснювалось на всіх рівнях виробництва продукції (галузь, підприємство, цех, агрегат) і враховувало як технологічні втрати енергії, так і додаткові втрати, зумовлені забезпеченням необхідних умов роботи обслуговуючого персоналу (опалення, вентиляція, кондиціонування і т.п.). Звідси значне різноманіття класифікаційних ознак питомих норм енергоспоживання, де кожна назва норми орієнтована на відповідну сферу виробництва продукції і розрахунок якої здійснюють найбільш прийнятним для існуючих умов методом. В той же час наявність в країні в період планової економіки дешевих енергоресурсів не сприяла уведенню режиму жорсткого контролю енергоспоживання. Ситуація змінилася при переході до ринкової економіки, де раціональне використання енергії є важливим чинником її конкурентоспроможності. Прийняття Верховною Радою України закону «Про енер-

гозбереження» [7], формування сучасних підходів до управління енерговикористанням потребує додаткового аналізу методів розрахунку питомих норм витрат енергії, оцінки їх відповідності більш жорстким умовам контролю ефективності споживання енергії. Вимоги до контролю в сучасних умовах виробництва продукції викладені в роботі автора [8]. Вони полягають у підвищенні оперативності контролю, його інформативності та достовірності. Слід оцінити прийнятність існуючих методів нормування до виконання сформульованих вимог. В статті наведені результати такого аналізу.

## III. МЕТА РОБОТИ

Аналіз існуючих методів нормування питомих витрат енергії та визначення методу, прийнятного для нормування показника енергоефективності при наявності швидкоплинних структурних та режимних змін в питомому енергоспоживанні сучасного промислового підприємства.

## IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ ТА АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

На відміну від «раціонального», «нераціональне» використання паливно-енергетичних ресурсів передбачає наявність витрат енергії, що перевищують показники питомих норм, визначених системою стандартів або діючими нормами питомих витрат енергії [9]. Нормативні витрати відносять до розряду неусувних, тобто зумовлених особливостями реалізації технологічного процесу. Понаднормативні витрати (перевитрати) зумовлені, як правило, використанням нераціональних режимів роботи обладнання, його несправністю, низькою професійною підготовкою обслуговуючого персоналу. Перевитрати розраховують за формулою [9]

$$\Delta B_c = (B_\phi - B_n) \cdot W_\phi \quad (1)$$

де  $B_\phi$ ,  $B_n$  – фактичні та нормовані питомі витрати енергії на виробництво продукції;  $W_\phi$  – обсяг виробленої продукції в розрахунковий термін.

Наявність перевитрат потребує визначення причин їх виникнення та уведення в дію механізму їх ліквідації, що забезпечується діючою системою управління енерговикористанням. Відсутність перевитрат свідчить про те, що в процесі випуску продукції витрати енергії відповідають визначеним нормованим значенням, а у деяких випадках вони нижчі цих значень. Раціональне використання підприємством енергетичних ресурсів повинно заохочуватися, про що наголошує закон України «Про енергозбереження» [7]. Один із основних принципів державної політики енергозбереження полягає в «поєднанні методів економічного стимулювання та фінансової відповідальності з метою раціонального використання та економічного витрачання паливно-енергетичних ресур-

сів». Так, наприклад, передбачається «матеріальне стимулювання колективів та окремих робітників за ефективне використання та економію паливно-енергетичних ресурсів», а також «введення плати за нераціональне використання паливно-енергетичних ресурсів у вигляді надбавок до діючих цін та тарифів залежно від перевитрат паливно-енергетичних ресурсів щодо витрат, встановлених стандартами». Звідси зрозуміло, що сам факт наявності або відсутності перевитрат енергії приводить до відповідно протилежних наслідків в управлінні енерговикористанням (заохочення або стягнення). З точки зору формування тарифної політики важливим є відносне значення перевитрат енергії  $\Delta B_C / B_H$ .

Необхідність розрахунку реальних числових значень  $\Delta B_C$  в процесі контролю ефективності використання енергії приводить до розуміння важливості забезпечення достовірності отриманої інформації. Питання полягає у тому, чи містить розрахунок суттєву похибку, яка може привести до абсолютно протилежних висновків (наявність, чи відсутність перевитрат енергії) з різними оцінками роботи колективу її виконавців. Проаналізуємо складові формули (1). Визначення фактичних значень  $B_\phi$  не викликає ускладнень. Дійсно, значення витрат енергії вимірюють лічильниками, точність яких визначена паспортними даними. Не містить причин для виникнення похибки реєстрація значень  $W_\phi$ . Претензії до завищеної похибки розрахунку можуть виникнути при визначенні  $B_H$ . Дійсно, процес нормування питомих витрат енергії не є простим, існують різні методи розрахунку, які застосовують, виходячи з конкретних умов виробництва, цілей визначення значень  $B_H$  і т.п. Між тим, методика розрахунку  $\Delta B_C$ , викладена в [9], не містить конкретних вимог до точності розрахунку цього параметра. Немає ніяких рекомендацій стосовно достовірності розрахункових значень параметра  $B_H$ . Виходячи з цього, автори статті вважають за необхідне проаналізувати переваги і недоліки існуючих методів нормування, виходячи, в першу чергу, з досягнутої точності результатів.

Вплив сукупності факторів, що змінюються у часі, на показники енергоспоживання об'єкта приводять до необхідності застосування середніх значень нормованих витрат енергії. Нормовані значення діють певний термін (місяць, квартал, рік). Потім їх уточнюють або повністю змінюють, виходячи зі зміни умов виробництва продукції. Норми можуть стосуватися окремих агрегатів, технологічних процесів, а можуть містити складові, характерні для підприємства в цілому. Розрахунок питомих норм енергоспоживання є важливим як з точки зору визначення завдань для контролю ефективності використання енергії, так і визначення прогнозованих значень майбутніх обся-

гів витрат енергії на виробництво продукції підприємством в цілому, або його підрозділами. Остання складова часто потребує підвищеної точності розрахунку, так як значні похибки супроводжуються суттєвими фінансовими втратами [10]. Тут можуть бути застосовані також укрупнені норми [6], вимоги до точності яких менш жорсткі. Терміни дії розрахованих питомих норм витрат енергії значною мірою залежать від умов виробництва продукції. Якщо ці умови не змінюються, або змінюються незначно, то необхідність заміни діючих питомих норм відсутня. Зміна умов може бути зумовлена зміною властивостей напівфабрикатів, які застосовують при виробництві продукції, зміною впливу навколишнього середовища на протікання технологічного процесу, активністю обслуговуючого персоналу при впровадженні засобів з енергозбереження. Така зміна повинна супроводжуватися оперативними управлінськими діями, які будуть сприяти ліквідації нераціонального використання енергетичних ресурсів, реалізації енергоефективних режимів. Відсутність змін в енергоспоживанні, пов'язаному з діями обслуговуючого персоналу (режими роботи обладнання, ремонтні роботи) свідчить про наявність застійних явищ, коли вклад людського фактору в енергетичну ефективність не проявляється.

Існує безліч методів розробки питомих норм енергоспоживання. Найбільше розповсюдження отримали: експериментальний метод, розрахунково-аналітичний та статистичний [2], [3], [5], [6]. Розглянемо їх суть, переваги та недоліки.

Експериментальний метод передбачає проведення ряду експериментальних досліджень. Розглядаються умови наявності непошкодженого налагодженого обладнання, працюючого в режимах, передбачених технологічними регламентами та інструкціями. Вимірювання витрат енергії здійснюються на кожній операції технологічного процесу. Потім визначають сумарні витрати [6]. Метод потребує застосування значної кількості вимірювальних приладів. Навантаження технологічного обладнання, як правило, змінюється. Необхідна статистична обробка значної кількості результатів вимірювань. До переваг методу слід віднести визначення окремих складових загальних витрат енергії (для окремих операцій технологічного процесу), що важливо з точки зору визначення переліку витрат та складання енергетичного балансу процесу. Найбільш енерговитратні складові повинні бути в зоні постійної уваги фахівців з енергетичного менеджменту. Недолік методу проявляється в тому, що сам процес вимірювання є трудомістким. Виходячи з цього, отримання оперативних даних, пов'язаних із суттєвими змінами швидкоплинних в часі умов протікання технологічного процесу, проблематично. Оперативність отримання інформації може бути забезпечена при безперервності вимірювань, що суттєво ускладнює процедуру проведення експериментів. Тому експериментальний метод доцільно застосовувати, реалізуючи процедуру періодичних вимірювань, що прийнятно для технологічних процесів з порівняно стабі-

льними в часі параметрами енергоспоживання. В той же час слід віддати належне високій достовірності отриманих значень витрат енергії, де похибка вимірювання визначається класом точності застосованих вимірювальних приладів.

Розрахунково-аналітичний метод дозволяє здійснити розрахунок витрат енергії, використовуючи аналітичні залежності, що зв'язують рівні витрат з параметрами, від яких вони залежать. Ураховуючи той факт, що кількість таких параметрів, як правило, значна, отримані для розрахунку залежності мають складну структуру і малоприматні для інженерних розрахунків. Тому в практиці використовують більш прості залежності, які дозволяють оцінити рівень витрат енергії і не претендують на високу точність отриманих результатів. Зазвичай ці залежності використовують паспортні дані обладнання і враховують ступінь його завантаження в технологічному процесі. Режими роботи обладнання враховуються шляхом застосування різних коефіцієнтів (увімкнення, завантаження і т.п.). Ці коефіцієнти в довідниковій літературі задають в певних межах їх можливих значень, що приводять до неможливості визначення конкретних значень і суттєво знижує точність (і достовірність) розрахунків. Так же, як і в експериментальному методі, розрахунки витрат енергії здійснюють для кожного елементу технологічної лінії окремо, що дозволяє складати енергетичні баланси технологічних процесів і визначити найбільш енерговитратні елементи системи. Поетапний розрахунок витрат енергії зумовлює значну трудомісткість методу. В той же час наявність аналітичних залежностей сприяє поглибленню аналізу, спрощує пошук енергоефективних рішень у випадку приведення фактичних енерговитрат до нормованих значень.

Як приклад, проаналізуємо методику розрахунку питомих норм витрат електроенергії на основні і допоміжні технологічні процеси, викладену в [9]. Методика передбачає знаходження суми значень норм витрат енергії окремих складових

$$H = H_{\tau} + a_{\text{дон}} + a_{\text{ос}} + \Delta a_{\text{ем}} + \Delta a_{\text{мп}} \quad (2)$$

де  $H_{\tau}$ ,  $a_{\text{дон}}$  – норми витрат електроенергії на технологічні та допоміжні потреби;  $a_{\text{ос}}$  – норми витрат електроенергії на освітлення;  $\Delta a_{\text{ем}}$ ,  $\Delta a_{\text{мп}}$  – норми витрат енергії в електричних мережах, трансформаторах.

При використанні залежності (2) слід пам'ятати, що питомі витрати енергії, як правило, залежать від обсягу випущеної продукції і цю залежність слід ураховувати.

Витрати електроенергії на виконання і-тої технологічної операції [10]

$$W_{\text{Т.і.}} = n \cdot P_H \cdot t \cdot \kappa_u \cdot N \quad (3)$$

де  $n$  – кількість установок,  $P_H$  – номінальна потуж-

ність однієї установки;  $t$  – тривалість роботи установки протягом доби;  $N$  – період роботи установки;  $\kappa_u$  – коефіцієнт використання установки.

У формулі (3) використовують середні значення коефіцієнта  $\kappa_u$ , що призводить до певної похибки при визначенні  $W_{\text{Т.і.}}$ . Наведені приклади з використанням залежностей (2) і (3) свідчать про те, що при застосуванні розрахунково-аналітичного методу часто користуються спрощеною структурою використаної аналітичної залежності, уведенням в формулу змінних, значення яких не є чітко визначеними, що, безумовно, знижує точність отриманих результатів. Така ситуація є типовою. При цьому, як правило, не звертають увагу на необхідність визначення похибки, яка супроводжує розрахунок в конкретних умовах. Зрозуміло також, що для вирішення деяких завдань (наприклад, орієнтовної оцінки питомих витрат енергії при загальнозаводському та галузевому плануванні) такий підхід є прийнятним, але при вирішенні завдань енергозбереження, де необхідно здійснювати жорсткий контроль ефективності використання енергії, застосування розрахунково-аналітичного методу потребує його удосконалення.

При контролі ефективності споживання енергії важливе значення має оперативність розрахунку нормованих значень витрат енергії. Так як розрахунки здійснюють, застосовуючи аналітичні залежності, то важливо враховувати зміни параметрів в цих залежностях, які відбулися в процесі виробництва продукції. Виникає необхідність їх вимірювання, що потребує додаткових витрат часу. Значна кількість необхідних розрахунків не сприяє підвищенню оперативності отримання кінцевого результату (значення питомої норми витрат енергії). Прискорення процесу можливе при використанні комп'ютерної техніки з програмним забезпеченням, яке формалізує і прискорює процедуру розрахунку.

Статистичний метод нормування як питомих, так і загальних витрат енергії є найменш трудомістким у порівнянні з розглянутими методами і передбачає реєстрацію значень споживання енергії в заданий термін часу (доба, зміна, цикл роботи обладнання) та відповідних значень обсягу випуску продукції [2,5,6]. Метод широко використовують в закордонній практиці контролю енергоспоживання. Розширюються і удосконалюються підходи до його застосування на вітчизняних промислових підприємствах. Важливим моментом статистичного підходу нормування є синхронна фіксація значень витрат енергії і відповідних значень обсягів випуску продукції. Це важлива вимога, так як зміщення фіксованих значень у часі не дозволяє отримати об'єктивну інформацію стосовно фактичних питомих витрат енергії, виключає її достовірність. Вимога важлива також з точки зору реалізації необхідної кількості лічильників енергії, обґрунтування розташування вузлів обліку. Зазвичай мова йде про споживання енергії цехом, підрозділом підприємства, енергоємним агрегатом. Важлива деталь полягає

у тому, що метод не передбачає обов'язкову реєстрацію енергоспоживання окремих складових технологічного процесу виробництва продукції. Часто лічильник фіксує витрати енергії технологічною лінією в цілому. Це дещо звужує можливості пошуку результативних дій у сфері енергозбереження, так як існує невизначеність найбільш енергоємних складових і, відповідно, невідомі підходи до зниження їх рівня. У процесі контролю енергоспоживання не завжди зрозуміло, що стало причиною перевитрат енергії в заданий період часу і які співвідношення витрат окремих складових процесу. Необхідність отримання такої інформації очевидна, так як її відсутність може привести до реалізації невірних управлінських рішень.

Розглянемо процедуру отримання інформації для застосування статистичного методу. В [7] запропоновано виконати не менше 50 вимірювань витрат енергії і відповідних обсягів продукції, але обґрунтування цієї цифри не надано. Між тим, існують причини, які визначають необхідність проведення певної кількості вимірювань, і ці причини пов'язані в першу чергу з точністю отриманих нормованих значень. Їх слід урахувувати. Наступний крок полягає в аналізі отриманих даних [7]. Якщо отримані експериментальні дані питомих витрат енергії відрізняються незначно і підпорядковуються нормальному (Гаусовому) закону розподілу, то нормоване значення визначають як середнє значення питомих витрат енергії  $W_{cp}$ . Визначають також середньоквадратичне відхилення випадкової величини цих витрат  $\delta$ . Це дозволяє сформулювати довірчий інтервал для випадкової величини, що, по суті, визначає похибку отриманого нормованого значення. Але слід наголосити на тому, що визначені межі стосуються точності нормування самої випадкової величини і потребують обґрунтування того, які рівні відхилень від середнього значення  $W_{cp}$  є прийнятними і відповідають раціональному використанню енергії, а які розташовані поза його межами. В [7] показано, що значення відхилень можуть бути прийнятими на рівні  $W_{cp} \pm 1,5 \cdot \delta$ . При цьому за межами діапазону залишаються 10-20% значень питомих витрат енергії. Зрозуміло, що тільки незначна кількість експериментальних даних буде потребувати додаткового аналізу з точки зору раціональності використання енергоресурсів, хоча в дійсності близько 50% експериментальних значень свідчать про відхилення від середнього рівня  $W_{cp}$  в бік завищеного енергоспоживання.

Таким чином, переваги статистичного методу нормування витрат енергії наступні:

- оперативність отримання та обробки інформації, низька трудомісткість розрахунку питомих норм;
- метод базується на експериментальних даних, отриманих шляхом проведення експерименту в умовах конкретного виробничого процесу, що гарантує відсутність значних похибок при визначенні питомих норм енергоспоживання;

- в окремих випадках, пов'язаних з визначенням законом розподілу випадкових величин питомого енергоспоживання, існує можливість оцінки точності визначення питомих норм у вигляді їх відхилень від середнього значення  $W_{cp}$ ;

- при визначенні питомих норм існує можливість урахування ряду факторів, які впливають на процес енергоспоживання, у вигляді встановленої статистичної залежності показника норми від перерахованих чинників. Це принципово важливо при наявності нестабільності цих факторів у процесі виробництва продукції. Ігнорування зміни факторів впливу знижує точність розрахунку питомих норм енергоспоживання;

- існує можливість визначення ступеня впливу окремих факторів на кінцевий результат нормування і, відповідно, пошуку прийнятних рішень для управління процесом із забезпеченням режиму раціонального використання енергоресурсів. Існує також можливість коригування цього впливу при зміні умов виробництва;

- при визначеній точності нормованого значення енергоспоживання існує можливість обґрунтування режиму нераціонального використання енергії з високим ступенем достовірності його існування (виходячи із значення довірчої ймовірності).

Недоліки статистичного методу нормування полягають у наступному:

- обмеженість сфери застосування визначених норм умовами конкретного виробництва;

- відсутність чіткого механізму визначення причини виникнення перевитрат енергії;

- відсутність інтегральних характеристик, що відтворюють досягнення підприємства в сфері підвищення енергоефективності в певному проміжку часу;

- відсутність лінійної залежності між питомими витратами енергії і обсягом продукції, що часто призводить до необхідності застосування статистичної залежності іншого типу (нелінійної) з використанням порівняно складного математичного апарату.

- Процедура нормування питомих витрат енергії є невід'ємною складовою контролю енергоефективності і, відповідно, управління енергоспоживанням. Дієве управління можливе при наявності всебічної інформації стосовно реального стану об'єкту контролю. Наявність оперативної інформації дозволяє ідентифікувати причину і своєчасно реагувати на відхилення енергоспоживання від встановленої норми. Інтегральні характеристики енергоспоживання характеризують динаміку змін, що відбуваються в тривалих проміжках часу і відповідають існуючим тенденціям процесу. Переваги статистичного методу можуть біти повною мірою реалізовані, а недоліки частково усунені завдяки поглибленню наукових досліджень в рамках розширення інформативності контролю, підвищення його оперативності та достовірності, що є важливим для сучасних промислових підприємств, працюючих в ринкових умовах. Передумови для цьо-

го існують. Обґрунтована параметризація статистичної моделі, прийнятні для змінної структури і режимів енергоспоживання способи обробки експериментальних даних здатні створити сприятливі умови для підвищення точності моделі, достовірності контролю, розширення його інформативності.

При застосуванні відомих методів нормування рівнів споживання енергетичних ресурсів часто використовують підхід, що передбачає розрахунок прогресивних норм використання енергії. Передбачається, що розраховані нормовані значення питомих витрат енергії повинні включати складові зниження витрат, зумовлені впровадженням заходів з енергозбереження в період дії розрахованих норм. Таким чином, заздальгідь впроваджується механізм контролю за виконанням намічених заходів з енергозбереження. Невиконання заходів розглядається як наявність «перевитрат енергії» з відповідними наслідками для колективу виконавців. Такий підхід ставить колектив в жорсткі рамки взятих зобов'язань. Причому встановлені межі майбутньої економії не завжди мають чітке і зрозуміле обґрунтування. Як правило, планується зниження енергоспоживання на декілька відсотків по відношенню до зафіксованого раніше рівня. Звідси ясно, що уведення прогресивних норм енергоспоживання потребує всебічного обґрунтування рівня очікуваної економії енергоресурсів і, відповідно, не є простим завданням. Відсутність належного обґрунтування слід розглядати як недолік застосування прогресивних норм енергоспоживання, який у першу чергу знижує точність прогнозу. На погляд авторів статті, більш вдалим рішенням при формуванні норми енергоспоживання є визначення середнього значення цього параметра в умовах, в яких здійснюється процедура контролю. Тоді реалізація заходів з енергозбереження призведе до зменшення значень  $\Delta B_{\phi}$  в формулі (1).

А  $\Delta B_C$  стане від'ємним, що повною мірою відповідає формулюванню поняття «енергоефективність» як зменшення кількості використаної енергії по відношенню до нормованого значення  $B_H$ .

Виконаний аналіз дозволяє визначити найбільш характерні риси розглянутих методів розрахунку, які у більшості випадків їм притаманні (табл. 1).

**Таблиця 1.** Аналіз методів розрахунку питомих норм енергоспоживання

Метод розрахунку питомих норм енергоспоживання	Точність розрахунку	Трудомісткість розрахунку	Складові енергобалансу
Експериментальний	Висока при стабільних параметрах процесу виробництва продукції	висока	Визначаються
Розрахунковий	низька	висока	Визнача-

во-аналітичний			ються
Статистичний	Висока з можливістю визначення похибки розрахунку	низька	Не визначаються

Ці риси значною мірою визначають прийнятні сфери застосування відомих методів, виходячи з точності та трудомісткості розрахунку, його інформативності. Визначені недоліки та переваги статистичного методу дозволяють розглядати його найбільш прийнятним для специфічних умов нормування показників питомого енергоспоживання сучасних промислових підприємств, що працюють в конкурентних умовах ринкової економіки.

## V. ВИСНОВКИ

1. В сучасних умовах промислового виробництва існуючі методи нормування питомого споживання енергії не завжди забезпечують високу точність розрахунку прогнозованого значення показника енергоефективності. Це виключає можливість отримання достовірного висновку стосовно економії або перевитрат енергії об'єктом контролю, створює ситуацію невизначеності в оцінці дій обслуговуючого персоналу підприємства в сфері енергозбереження.

2. Різноманіття існуючих питомих норм споживання енергії зумовлено широкою сферою застосування цих показників в процесі контролю енергоефективності процесу виробництва промислової продукції. Існуючі методи їх розрахунку орієнтовані на конкретні умови енергоспоживання, мають різну трудомісткість, забезпечують різну ступінь точності визначення показників та інформативність процесу контролю.

3. Виконано аналіз переваг та недоліків статистичного методу розрахунку. Низька трудомісткість методу, висока для практики нормування точність результату, що зумовлена використанням експериментальних даних, можливість визначення статистичної похибки розрахунку питомих норм витрат енергії, дозволяють вважати його найбільш прийнятним для вирішення завдань оперативного контролю ефективності використання енергії в сучасних умовах промислового виробництва. Існують можливості його удосконалення з метою розширення інформативності та підвищення достовірності контролю.

4. Розширення інформативності оперативного контролю енергоспоживання слід в першу чергу розглядати з точки зору визначення причин перевитрат або економії енергії, співвідношення чинників, що впливають на отриманий результат. Визначення інтегральних характеристик енергоспоживання дозволить відслідковувати динаміку довгострокових змін, визначати існуючу тенденцію процесу. Пошук можливостей для розширення інформативності та підвищення достовірності контролю доцільно зосередити



на удосконаленні статистичної моделі для нормування питомого енергоспоживання.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Дубровский Н.А. Конкурентоспособность продукции и основные пути ее достижения/ Н.А. Дубровский, П.И. Лещенко// Весник Полоцкого Государственного университета.– 2010. –№4. –С.66-71.
- [2] Шаюхов Т.Т. Расчет удельных норм и прогнозирование электропотребления на промышленных предприятиях/ Т.Т. Шаюхов// Инновационный транспорт.– 2016. –№3. –С.8-12.
- [3] Кудрин Б.И. Концепция электросбережения в государственных стандартах и ее практическая реализуемость/ Б.И. Кудрин// Электрика.– 2002. –№1. –С.3-13.
- [4] Никифоров Г.В. Концепция электросбережения в государственных стандартах и ее практическая реализуемость/ Г.В. Никифоров, В.К. Олейников, Б.И. Заславец. – М.: Энергоиздат, 2003. – 480 с.
- [5] Системи енергоменеджменту та їх математичне забезпечення: навч. посібник/ Г.Г. Півняк, С.І. Выпанасенко. О.І. Хованська, Ю.В. Хацкевич, Н.С. Дрешпак. – Д.: Національний гірничий університет, 2013. – 214 с.
- [6] Электроснабжение потребителей и режимы: учебн. пособие/ Б.И. Кудрин, Б.И. Жилин, Ю.В. Матюнин. – Д.: Національний гірничий університет, 2013. – 412 с.
- [7] «Про енергозбереження» [Електронний ресурс]: Закон України [Прийнятий постановою Верховної Ради України № 75/94-ВР від 01.07.94.– Режим доступу:<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/74/94-%D0%B2%D1%80>
- [8] Дрешпак Н.С. Системи контролю енергоефективності виробничих процесів та шляхи їх удосконалення/ Н.С. Дрешпак// Електротехніка та електроенергетика.– 2020. –№1. –С.40-48.
- [9] Методика визначення нераціонального (неефективного) використання паливно-енергетичних ресурсів: методичні рекомендації/ Національне агентство України з питань ефективного використання енергетичних ресурсів. – Київ, 2009. – 25 с.
- [10] Методические рекомендации по нормированию топливно-энергетических ресурсов для организаций системы: методические рекомендации/ Министерство сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь. – Минск, 2017. – 141 с.
- [11] Vypanasenko S., Dreshpak N. (2013) The features of energy efficiency measurement and control of production processes Energy efficiency improvement of geotechnical systems, 1, 71-78.
- [12] Vypanasenko S., Dreshpak N. (2015) Informational and methodological support for energy efficiency control Power Engineering, Control and Information Technologies in Geotechnical Systems, 2, 53-57.
- [13] Rambabu Pothina, Vladislav Kecojevic (2007). A Gyrotory Crusher Model and Impact Parameters Related to Energy Consumption. Minerals and Metallurgical Processing, 24(3), 170-180.
- [14] Aslaksen E. (2008) Designing complex systems. Foundations of design in the functional domain. Auerbach publications, 176.
- [15] Barrera D., Diaz M. (2011) Communicating systems with UML 2. Modeling and analysis of network protocols. ISTE ltd, 268.
- [16] Boehm B. (2010) A spiral model of software development and enhancement. Object management group, 180.
- [17] Adamatzky A. (2017) Advantages in unconventional computing. Prototypes, Models and Algorithms. Springer International Publishing, 812.

Стаття надійшла до редакції 20.08.2021

## УДЕЛЬНЫЕ НОРМЫ РАСХОДА ЭНЕРГИИ В ЗАДАНИИ КОНТРОЛЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЕЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

ДРЕШПАК Н.С.

канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры электротехники Национального технического университета «Днепропетровская политехника», Днепр, Украина, e-mail: dreshpak.n.s@nmu.one.

ДРЕШПАК А.С.

канд. техн. наук, доцент кафедры технологического инжиниринга переработки материалов Национального технического университета «Днепропетровская политехника», Днепр, Украина, e-mail: dreshpak.o.s@nmu.one.

ВЫПАНАСЕНКО С.И.

докт. техн. наук, профессор, профессор кафедры электроэнергетики Национального технического университета «Днепропетровская политехника», Днепр, Украина, e-mail: vypanasenko.s.i@nmu.one.

**Цель работы.** Анализ существующих методов нормирования удельных затрат энергии и определения метода, приемлемого для нормирования показателя энергоэффективности при наличии быстротечных струп-

турных и режимных изменений в энергопотреблении современного промышленного предприятия.

**Методы исследования.** Анализ существующих методов нормирования удельных затрат энергии, определение их недостатков и преимуществ. Сопоставление возможностей этих методов с требованиями нормирования показателей удельного энергопотребления в условиях современного производства.

**Полученные результаты.** Определена необходимость повышения точности расчета удельных норм расхода энергии в задачах контроля эффективности ее использования. Это обеспечивает четкое разграничение режимов “рационального” и “нерационального” использования энергоносителей, способствует объективной оценке вклада в этот процесс действий обслуживающего персонала предприятия. Проанализированы существующие методы расчета удельных норм. Определена степень их приемлемости для решения задач нормирования показателей энергопотребления в современных условиях производства. Показано, что точность расчета экспериментальным методом высока при стабильных параметрах, влияющих на процесс энергопотребления. Расчетно-аналитический метод, как правило, не обеспечивает низкой погрешности расчета, имеет значительную трудоемкость, что ограничивает его использование в условиях повышенной оперативности контроля. В условиях контроля энергопотребления, характеризующихся существенными структурными и режимными изменениями, наиболее приемлемым является статистический метод нормирования, который характеризуется сравнительно низкими трудоемкостью и статистической погрешностью расчета, обусловленной применением экспериментальных данных. Раскрыты преимущества и недостатки метода. Возможность повышения информативности контроля следует увязывать с усовершенствованием статистической модели. Расширение оперативной информации, определение интегральных характеристик энергопотребления способствует формированию рациональных управленческих решений, обеспечению высокой энергоэффективности процесса производства промышленной продукции.

**Научная новизна.** Впервые предложено использование статистического метода нормирования удельного потребления энергии в системе контроля энергоэффективности производственных процессов при быстротечных структурных и режимных изменениях энергопотребления объекта. Акцентировано внимание на существенной зависимости показателя достоверности результатов контроля энергоэффективности производственного процесса (наличия экономии или перерасхода энергии) от точности расчета удельных норм расхода энергии. Определена зависимость оценки деятельности коллектива предприятия в сфере энергосбережения от достигнутой точности нормирования энергопотребления. Раскрыты перспективы усовершенствования метода в системе контроля энергоэффективности.

**Практическая ценность** состоит в определении приемлемого для условий современного промышленного производства метода нормирования удельных затрат энергии, а также путей его усовершенствования.

**Ключевые слова:** Контроль энергоэффективности; статистический метод, точность нормирования; достоверность контроля.

## SPECIFIC STANDARDS OF ENERGY CONSUMPTION IN THE PROBLEM OF CONTROLLING ITS USE EFFICIENCY

DRESHPAK N.S. Ph.D, associate professor, associate professor of electrical engineering department at Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine, e-mail: dreshpak.n.s@nmu.one.

DRESHPAK O.S. Ph.D, associate professor of the department of technological engineering of materials processing at Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine, e-mail: dreshpak.n.s@nmu.one.

VYPANASENKO S.I. Dr. tech. sciences, professor, professor of the department of power engineering at Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine, e-mail: vypanasenko.s.i@nmu.one.

**Purpose.** Analysis of the existing methods of specific energy consumption standardization and determination of the method acceptable for the standardization in conditions of transient structural and regime changes in energy consumption at a modern industrial enterprise.

**Methodology.** Analysis of the existing methods of specific energy consumption standardization, identification of their disadvantages and advantages. Comparison of the possibilities of these methods with the requirements for the specific energy consumption standardization in modern production.

**Findings.** Emphasis is focused on the significant dependence between reliability of the results of energy efficiency control of the production process (savings or overconsumption of energy) and the accuracy of the calculation of specific norms of energy consumption. The dependence between the assessments of the enterprise's staff energy saving activity and the achieved accuracy of energy consumption standardization is determined. It is highlighted that in energy efficiency standardization practice, the existing methods are focused on the production conditions, where their benefits are fully revealed. It is proved that due to the increased accuracy of the standardization, efficiency of obtaining and processing information, the statistical method is the most acceptable for the conditions of transient structural and re-

gime changes in the power consumption of the object. Prospects for improving the method of energy efficiency control are described.

**Originality.** For the first time, the use of the statistical method of specific energy consumption standardization in the system of energy efficiency control of production processes with rapid structural and regime changes in energy consumption of the object is proposed.

**Practical value** is to determine an acceptable method of specific energy consumption standardization in the conditions of modern industrial production, as well as ways to improve it.

**Keywords:** Energy efficiency control; statistical method, accuracy of standardization; reliability of the control.

## REFERENCES

- [1] Dubrovskij, N.A., Leshenko, P.I. (2010) Konkurentosposobnost proizvodcii i osnovnye puti ee dostizheniya Polotsk State University Bulletin, 4, 66-71 (in Russian).
- [2] Shayuhov, T.T. (2016) Raschet udelnyh norm i prognozirovanie elektropotrebleniya na promyshlennyh predpriyatiyah Innovative transport, 3, 8-12 (in Russian).
- [3] Kudrin, B.I. (2002) Konceptiya elektrosberezheniya v gosudarstvennyh standartah i ee prakticheskaya realizuemost. Electrician, 1, 3-13 (in Russian).
- [4] Nikiforov, G.V., Olejnikov, V.K., Zaslavec, B.I. (2006) Konceptiya elektrosberezheniya v gosudarstvennyh standartah i ee prakticheskaya realizuemost. M: Energoizdat, 480 (in Russian).
- [5] Pivnyak, G.G., Vypanasenko, S.I., Hovanskaya, O.I., Hatskevych, U.V., Dreshpak, N.S. (2013). Systemy enerhomenedzhmentu ta yikh matematychno zabezpechennia. D.: Natsionalnyi hirnychiy universytet, 214 (in Ukrainian).
- [6] Kudrin, B.I., Zhilin, B.I., Matyunin, Y.V. (2013) Elektrosnabzhenie potrebitel'ev i rezhimy. D: Natsionalnij girmichij univer-sitet, 412. (in Russian).
- [7] «Pro energozberezheniya» [Elektronnij resurs]: Zakon Ukrayini [Priinyatij postanovo Verkhovnoyi Radi Ukrayini № 75/94-BP від 01.07.94.– Rezhim dostupu: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/74/94-%D0%B2%D1%80> (in Ukrainian).
- [8] Dreshpak, N.S. (2020) Sistemi kontrolyu energoefektyvnosti virobnychih procesiv ta shlyahi yih udoskonalennya. Electrical engineering and electrical energy, 1, 40-48 (in Ukrainian).
- [9] Nacionalne agentstvo Ukrayini z pi-tan effektivnogo vikoristannya energetichnih resursiv (2009) Metodika viznachennya neracionalnogo (neefektyvnogo) vikoristannya palivno-energetichnih resursiv. Kyiv:GO (in Ukrainian).
- [10] Ministerstva selskogo hozyajstva i prodovolstviya Respubliki Belarus (2017) Metodicheskie rekomendacii po normirovaniyu toplivno-energeticheskikh resursov dlya organizacii sistemy: metodicheskie rekomendacii. Minsk: GO (in Russian).
- [11] Vypanasenko, S., Dreshpak, N. (2013) The features of energy efficiency measurement and control of production processes Energy efficiency improvement of geotechnical systems, 1, 71-78.
- [12] Vypanasenko, S., Dreshpak, N. (2015) Informational and methodological support for energy efficiency control Power Engineering, Control and Information Technologies in Geotechnical Systems, 2, 53-57.
- [13] Pothina, R., Kecojevic, V. (2007). A Gyrotory Crusher Model and Impact Parameters Related to Energy Consumption. Minerals and Metallurgical Processing, 24(3), 170-180.
- [14] Aslaksen, E. (2008) Designing complex systems. Foundations of design in the functional domain. Auerbach publications, 176.
- [15] Barrera, D., Diaz, M. (2011) Communicating systems with UML 2. Modeling and analysis of network protocols. ISTE ltd, 268.
- [16] Boehm, B. (2010) A spiral model of software development and enhancement. Object management group, 180.
- [17] Adamatzky, A. (2017) Advantages in unconventional computing. Prototypes, Models and Algorithms. Springer International Publishing, 812.

## АВТОМАТИЗОВАНА МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ПАРАМЕТРІВ ДЛЯ НЕТРАДИЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ОПАЛЕННЯ ТА КОНДИЦІОНУВАННЯ БУДІВЕЛЬ

ОЛІШЕВСЬКИЙ І.Г. аспірант групи 151А-19-2, НТУ «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна, e-mail: olishevskiyih@gmail.com;

ОЛІШЕВСЬКИЙ Г.С. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електроенергетики НТУ «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна, e-mail: olishevskiyg@ukr.net;

**Мета роботи.** Розробити автоматизовану методику розрахунку параметрів для теплонасосних систем опалення, кондиціонування та гарячого водопостачання, призначених для застосування в побутових умовах при нестандартних потоках передавання теплової енергії.

**Методи дослідження.** Математичне моделювання термодинамічних процесів, що протікають в системах опалення, кондиціонування та гарячого водопостачання.

**Отримані результати.** Обґрунтована та розроблена автоматизована методика розрахунку параметрів нетрадиційної технології, що використовує стандартне теплонасосне обладнання системи водного опалення для режиму охолодження повітря в теплий період року, та скидання теплоти що відводиться в ґрунт. А для потреб гарячого водопостачання тепловий насос повітря-рідина, що працює в якості швидкісного водонагрівача.

Виконана оцінка розроблених раніше авторами технологій утилізації теплової енергії в будівлях. Перша технологія передбачала застосування схеми з тепловим насосом та тепловим акумулятором в холодний період, та дозволяла зменшити витрати умовного палива в два рази в порівнянні із газовою колонкою для гарячого водопостачання на тому самому об'єкті. Друга технологія передбачала утилізацію теплоти за допомогою теплового акумулятору в комплексній системі кондиціонування та гарячого водопостачання в теплий період, що дозволяє заощадити від 74 до 82% умовного палива в порівнянні зі схемою з котлом та кондиціонером без теплового акумулятору.

Зроблено критичні висновки щодо необхідності застосування для цих технологій додаткового габаритного обладнання та надлишкової кількості отримуваної гарячої води. Проаналізовані можливості реалізації такої схеми. Зроблено аналітично обґрунтовані рекомендації щодо конструкції (орєбрення поверхонь теплообміну) опалювальних приладів та параметрів режимів їх експлуатації в холодний та теплий періоди року. При цьому виконувалась умова незмінності площ теплообміну опалювальних приладів та базової витрати води в системі опалення. Обґрунтована необхідність в регулюванні режиму кондиціонування шляхом зміни витрати води в системі для підтримання постійної температури внутрішнього повітря при коливаннях температури зовнішнього повітря.

**Наукова новизна.** Вперше приділяється увага дослідженням нетрадиційних способів застосування теплонасосного опалення з метою опалення, кондиціонування та гарячого водопостачання житлових приміщень. Розроблена автоматизована методика визначення раціональних параметрів для даних технологій.

**Практична цінність.** Розроблено автоматизовану методику формування керуючої залежності масової витрати води в системі від температури зовнішнього повітря з умови постійності заданої комфортної температури внутрішнього повітря. Проаналізовано застосування теплового насоса повітря-рідина для гарячого водопостачання в теплий період, відзначено високий коефіцієнт перетворення енергії (14...22). Обґрунтовано економію умовного палива від застосування розглянутої технології від 13% до 18% в порівнянні з технологією, що використовує тепловий акумулятор.

**Ключові слова:** Автоматизована методика; тепловий насос; опалення; гаряче водопостачання; кондиціонування; економія палива.

### І. ВСТУП

На сьогоднішній день дуже гостро стоїть питання енергоефективності систем опалення. Близько третини від загальносвітового споживання паливно-енергетичних ресурсів спрямовано на потреби опалення [1]. В умовах існуючої на даний період часу газової кризи, з рекордними цінами на газ, питання

відходу до нетрадиційних, енергоефективних способів опалення необхідно вважати дуже актуальним. Також, велика кількість енергоресурсів витрачається на гаряче водопостачання, вентиляцію та кондиціонування повітря в будівлях [5], [6]. Найбільш перспективними системами опалення, з точки зору енергоефективності, є системи на базі теплових насосів. При цьому, кількість енергії, що підводиться до споживача

від зовнішнього низько потенційного джерела (грунт, водойма, повітря), перевищує значення енергії, що затрачена на привод теплового насосу в 3 – 5 разів. Це відношення називають коефіцієнтом трансформації енергії теплового насосу. Для досягнення більш високих значень даного коефіцієнту необхідно зменшувати різницю температур між випаровувачем та конденсатором теплового насосу.

У випадку систем опалення та гарячого водопостачання ми маємо зафіксоване значення температури на конденсаторі, нижче якого ми не можемо опускати через задане теплове навантаження. Тому альтернативним шляхом підвищення енергоефективності є збільшення температури випаровування за допомогою різних технічних засобів, таких як тепловий акумулятор.

## II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

Раніше авторами було розглянуто та досліджено можливість застосування теплового насосу (ТН) в теплоенергетичних системах будівель [3]. Було досліджено схему застосування теплового акумулятору (ТА) в комплексній системі кондиціонування та гарячого водопостачання (ГВС).

Дана схема дозволяє заощадити від 74% до 82% умовного палива у порівнянні зі схемою з котлом та кондиціонером без ТА.

Також була досліджена схема застосування теплового акумулятору і ТН в комплексній системі вентиляції та гарячого водопостачання [2], [3], що дозволяє заощадити у холодний період до 57% умовного палива в порівнянні із газовою колонкою. При цьому була обґрунтована можливість створення єдиної системи ГВС, що працює цілий рік. Де в теплий період буде використовуватися теплота воздуха що кондиціонується, а в холодний період – теплота повітря, що виходить через вентиляцію в навколишнє середовище. Однак, розглянуті вище енергоефективні технології потребують установки додаткового габаритного та дорогого обладнання, а об'єм отримуваної гарячої води за сутки складно використати повністю, що зменшує маневреність усієї системи. Тому було запропоновано нову нетрадиційну технологію, що використовує вихідне теплонасосне обладнання системи водного опалення для режиму охолодження повітря в теплий період та скидання теплоти що відводиться – в грунт. Для потреб гарячого водопостачання було запропоновано застосування додаткового теплового насосу повітря-рідина, що працює на водонагрів. Це має зменшити витрату енергоресурсів, виключити необхідність у створенні непотрібних запасів гарячої води, та усунути складнощі в регулюванні системою.

Варто відмітити актуальність застосування таких технологій в регіонах з підвищеним температурним режимом в теплий період року.

В джерелах [7]-[9] наведені основні принципи, на яких базується розрахунок систем опалення в даній

роботі, а також побудова математичних моделей теплових насосів, що застосовані в системах опалення, кондиціонування та гарячого водопостачання.

До уваги були прийняті роботи [10], [13], в яких розглянуть аспекти моделювання теплових процесів у будівлях. При побудові математичної моделі системи радіаторного опалення була врахована робота [11]. Системи регулювання були розглянуті раніше в джерелі [12].

Математичний апарат, що використовується для опису термодинамічних процесів в описуваних системах, більш детально розглянутий в роботах [14]-[15].

Для керування роботою теплового насосу розглядаються два режими управління: циклічний та інверторний. У випадку широкого впровадження інверторного обладнання, для керування електричним приводом теплового насосу, ми можемо зіштовхнутися із впливом вищих гармонік, що генеруються напівпровідниковими перетворювачами в мережу живлення на якість електричної енергії, а також на надійність системи електропостачання [16]. Використовуючи методику з роботи [16] обґрунтовується збереження в допустимих нормах відхилення показників якості та надійності електричної енергії у випадку застосування інверторного керування, яке є більш ефективним з точки зору енергозбереження, в порівнянні з циклічним.

Таким чином, подальша розробка технологій раціонального використання енергоресурсів в теплонасосних комплексних системах опалення, кондиціонування та гарячого водопостачання є актуальною.

## III. ЦІЛЬ РОБОТИ

Проведення аналізу існуючих енергоефективних технологій на базі теплових насосів. Розробка автоматизованої методики розрахунку параметрів для теплонасосних систем опалення, кондиціонування та гарячого водопостачання, що застосовуються в побутових умовах, при нестандартних потоках передавання теплової енергії.

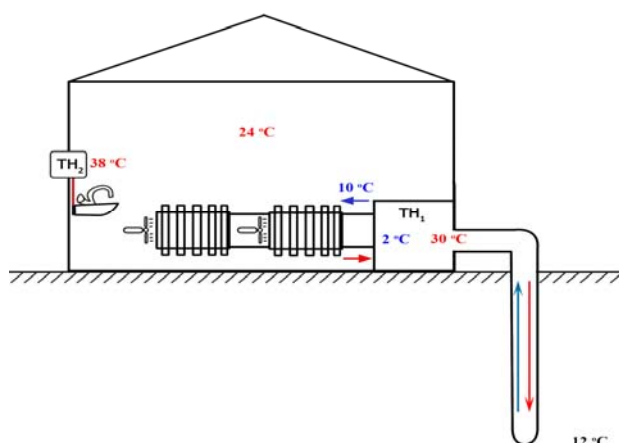
## IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ ТА АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Було досліджено технологію використання ґрунтового теплового насосу водяної системи опалення будівлі для потреб кондиціонування будівлі. При цьому тепловий насос повинен працювати на охолодження будівлі, передаючи теплоту в грунт (рис. 1), що дозволить знизити температуру конденсації холодоагенту з 46 °С до 30 °С при схемі з тепловим акумулятором. Це обґрунтовується властивістю ґрунтів зберігати на глибині 2 м стабільну температуру порядку 8 °С протягом року.

Дана установка являє собою парокомпресорну установку, що працює за основним холодильним циклом.

Характеристики теплонасосних установок були визначені по розробленій раніше, та широко вживаній авторами методиці визначення функціональних залежностей параметрів холодильних циклів від температур конденсації при заданих температурах випаровування на основі даних  $p, i$  – діаграми обраного холодоагенту.

В якості об'єкту дослідження, для зручності порівняння, було прийнято ту саму одноповерхову будівлю, що і в роботах [3]-[4], із об'ємом  $450 \text{ м}^3$  та житою площею  $180 \text{ м}^2$ .



**Рисунок 1.** Схема комплексної системи ТН та ГВС будівлі.

Автоматизована методика розрахунку параметрів ґрунтового та повітряного ТН для нужд кондиціонування та ГВС будівлі включає наступний алгоритм дій.

1. Ввід геометричних та теплофізичних параметрів будівлі, завдання внутрішньої та зовнішньої температур, а також температури охолодження повітря, фізичних параметрів повітря, води та холодоагенту, технічних параметрів теплових насосів, початкових та кінцевих температур води в системі для різних режимів.

2. Формування функцій зміни параметрів холодильного циклу від температури конденсації холодоагенту для постійних температур випаровування, необхідних для моделювання роботи теплових насосів.

3. Визначення функціональних залежностей теплових навантажень опалення та охолодження будівлі від температури зовнішнього повітря.

4. Порівняльний аналіз та розрахунок теплообмінних поверхонь батарей для режимів опалення та кондиціонування будівлі.

5. Формування функцій залежності внутрішньої температури повітря та кінцевої температури води в зворотньому трубопроводі від температури зовнішнього повітря та витрати води в системі відповідно.

6. Аналіз отриманих функцій та визначення раціональних значень площі теплообмінних поверхонь,

швидкості їх обдуву, коефіцієнту оребрення, базової витрати води в системі, що одночасно задовольняє теплові навантаження опалення та охолодження.

7. Формування керуючої залежності витрати води в системі від температури зовнішнього повітря із умови постійності температури внутрішнього повітря ( $24 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

8. Визначення енергетичних характеристик теплонасосної системи ГВС (повітря-вода).

9. Визначення раціональних енергетичних характеристик комплексної системи ґрунтового теплонасосного кондиціонування та повітряного теплонасосного ГВС будівлі.

Для цієї технології на основі  $p, i$  – діаграми обраного холодоагенту (фреон – 11) були визначені функції зміни параметрів холодильного циклу від температури конденсації холодоагенту при температурі випаровування холодоагенту  $2 \text{ }^\circ\text{C}$  (для запобігання обмерзання поверхонь випаровувача).

Розглянемо процес обчислення більш детально.

Спочатку визначаються теплові навантаження опалення та охолодження будівлі в залежності від температури зовнішнього повітря, виходячи з теплофізичних характеристик матеріалів та конструкції будівлі, а також температурних умов внутрішнього та зовнішнього середовища.

Виконується розрахунок площі поверхонь теплообміну приладів опалення та витрати води в системі. При цьому, для максимального теплового навантаження системи опалення були прийняті температури у прямому та зворотньому трубопроводах  $85 \text{ }^\circ\text{C}$  та  $70 \text{ }^\circ\text{C}$  відповідно, а температуру води в прямому трубопроводі для режиму охолодження прийнято  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ . В якості комфортної температури внутрішнього повітря для холодного періоду була прийнята температура  $21 \text{ }^\circ\text{C}$ , а для теплого періоду  $24 \text{ }^\circ\text{C}$ . Мінімальна температура зовнішнього повітря у холодний період прийнята  $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ , а максимальна в теплий період  $40 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Із розрахунку стає зрозумілим, що для роботи вихідної системи опалення на охолодження в максимальному режимі – необхідно збільшити щонайменше вдвічі площу теплообміну приладів опалення, а також вдвічі збільшити витрату води в системі. Такі дії є нераціональними з точки зору експлуатації. Крім того, збільшення постійної витрати води в системі в 2 рази призведе до значного росту потужності електричного приводу насоса (в 8 разів).

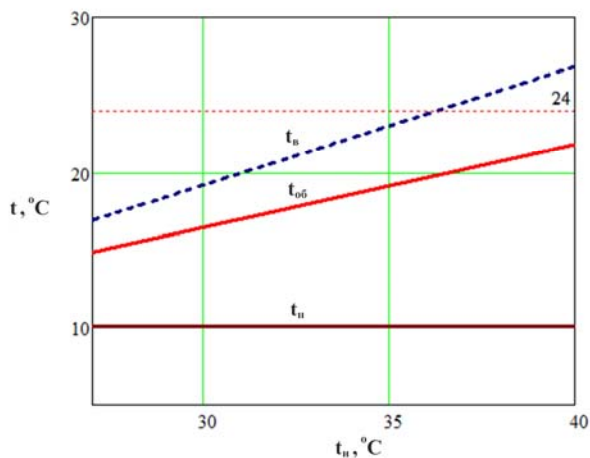
Тому було прийнято рішення застосувати оребрені теплообмінні поверхні, а також, при режимі кондиціонування здійснювати постійний поперечний обдув цих поверхонь для підвищення коефіцієнту тепловіддачі від повітря та відповідно коефіцієнта тепlopередачі опалювальних приладів.

Для визначення раціональних значень коефіцієнту оребрення та швидкості обдуву теплообмінних поверхонь були сформовані функції залежності внут-

рішньої температури повітря від температури зовнішнього повітря та залежності кінцевої температури води в зворотньому трубопроводі від витрати води в системі, що працює в режимі кондиціонування. Ці функції були отримані на основі сумісного рішення системи рівнянь теплопередачі та теплового балансу для теплообмінних приладів.

В результаті дослідження цих функцій на предмет вибору значень коефіцієнту обребнення та швидкості обдуву теплообмінних поверхонь, при яких зберігалася б задана температура внутрішнього повітря 24 °С, була визначена швидкість обдуву 2,5 м/с та коефіцієнт обребнення 9. При цьому в єдиному комплексі прораховувалися рівняння теплопередачі та теплового балансу для опалювального режиму системи, з метою визначення єдиної площі теплообміну та витрати води в контурі  $G = 0,133$  кг/с. Таку витрату води було взято як базову для обох режимів - опалення та кондиціонування.

Для цих даних, та у відповідності з навантаженням охолодження, були визначені залежності температур води в зворотньому трубопроводі та температури охолодженого повітря від температури зовнішнього повітря при постійному значенні витрати води в системі та постійній температурі води в прямому трубопроводі, що дорівнює 10 °С (рис. 2).



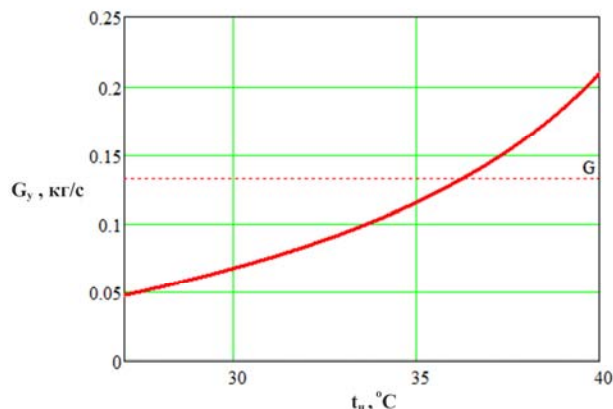
**Рисунок 2.** Залежності температури води в зворотньому трубопроводі  $t_{об}$  та температури охолодженого повітря  $t_в$  від температури зовнішнього повітря  $t_н$  при температурі води в прямому трубопроводі  $t_н=10$ °С

Проаналізувавши отримані залежності можна зробити висновок, що температура охолодженого повітря значно змінюється в залежності від температури зовнішнього повітря (від 17 °С до 27 °С). В той час, як комфортна температура внутрішнього повітря для теплого періоду прийнята рівною 24 °С, та виконується тільки при температурі зовнішнього повітря  $t_н=36$  °С. Такі відхилення температури внутрішнього повітря небажані для організму людини.

Було прийнято рішення – здійснювати регулювання температури внутрішнього повітря шляхом змі-

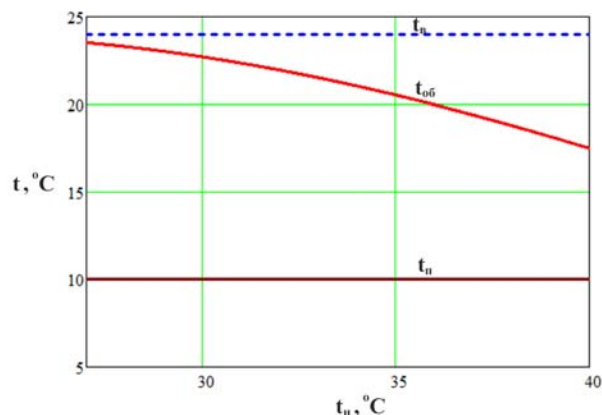
ни витрати води в системі з метою підтримання температури 24 °С при будь-якій температурі зовнішнього повітря.

На базі функціональної залежності температури внутрішнього повітря від температури зовнішнього повітря та витрати води в системі була сформована керуюча залежність масової витрати води в системі від температури зовнішнього повітря з умови постійності заданої комфортної температури внутрішнього повітря (рис. 3). Дану керуючу залежність можна задати в контролер керування системи кондиціонування будівлі.



**Рисунок 3.** Керуюча залежність  $G_y$ , витрати води в системі від температури зовнішнього повітря

При виконанні данної залежності витрати води в системі – були отримані нові залежності температури води в зворотньому трубопроводі та температури охолодженого повітря від температури зовнішнього повітря при постійній температурі води в прямому трубопроводі 10 °С (рис. 4).



**Рисунок 4.** Залежність температури води в зворотньому трубопроводі  $t_{об}$  та температури охолодженого повітря  $t_в$  від температури зовнішнього повітря  $t_н$  при впровадженні керуючої залежності

Таким чином, за допомогою керуючої залежності витрати води в системі забезпечено постійність комфортної температури внутрішнього повітря при різних температурах зовнішнього повітря. В якості не-



доліку можна зазначити перевищення значення витрати води в системі відносно базового значення системи опалення, в області високих температур зовнішнього повітря (вище 36 °C) що продемонстровано на рис. 3. Однак, ця область значно менша ніж область задіяних температур зовнішнього повітря, що з запасом компенсує можливе перевищення витрат енергії в зоні високих температур, порівняно з базовою системою.

Для гарячого водопостачання запропоновано використовувати замість теплового акумулятору тепловий насос повітря-рідина, який буде використовувати теплоту зовнішнього повітря та працювати для підвищення ефективності у двох режимах: з температурою випаровування холодоагенту (фреон-11) 20 °C для температур зовнішнього повітря від 27 °C до 37 °C та з температурою випаровування 30 °C для температур зовнішнього повітря вище 37 °C. Це дозволить збільшити коефіцієнт перетворення енергії теплового насосу в 1,5...2 рази (до 14...22) у порівнянні із схемою кондиціонер + тепловий акумулятор.

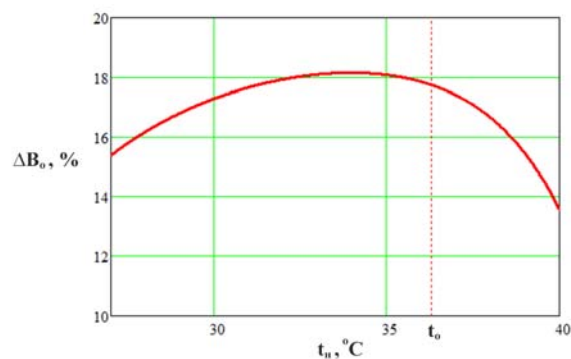
Система гарячого водопостачання розраховувалася для 7-ми людей, по 70 літрів гарячої води на кожну людину на добу, температура води 38 °C, початкова температура для нагріву 15 °C, витрата гарячої води 5 літрів на хвилину, тепла потужність 8 кВт, потужність приводу теплового насосу 760 Вт в першому режимі, та 470 Вт у другому режимі.

В результаті було проведено порівняння витрат умовного палива між старою системою: кондиціонер та тепловий акумулятор, та новою системою: з двома окремими тепловими насосами на кондиціонування та гаряче водопостачання будівлі в залежності від температури зовнішнього повітря. Враховано витрати на приводи теплових насосів систем водного охолодження та гарячого водопостачання, а також циркуляційного водного насосу системи кондиціонування/опалення будівлі (рис. 5). При цьому розглядався варіант з регульованою витратою води в системі відповідно з створеною керуючою залежністю.

Аналізуючи отриману економію умовного палива, можна сказати про реальну перевагу нової нетрадиційної схеми застосування системи кондиціонування та гарячого водопостачання будівлі в теплий період, порівняно із дослідженою раніше системою з тепловим акумулятором. Варто відмітити максимум економії (18%), що припадає на область найбільш поширеного діапазону температур повітря влітку, при цьому рівень витрати води в системі близький до постійного рівня витрат води в опалювальному режимі, і є трохи меншим. Однак, і мінімальний рівень економії (13,5%) також має відчутне значення.

При цьому, за рахунок застосування теплового насосу повітря-вода, що має більш високі температури випаровування (20 °C та 30 °C) та відповідно коефіцієнти перетворення енергії в порівнянні із кондиціонером (10 °C), отримуємо економію умовного па-

лива окремо в системі гарячого водопостачання від 35% до 60%, не враховуючи те, що об'єм теплового акумулятору в старій схемі в 2 рази перевищував потреби в гарячій воді. Тому в новій технології відпадає необхідність в нагріві зайвих і значних об'ємів води, що призводить до додаткової економії ресурсів.



**Рисунок 5.** Порівняльна економія умовного палива в новій схемі кондиціонування та гарячого водопостачання в залежності від температури зовнішнього повітря порівняно зі старою схемою

В свою чергу, в холодний період року, тепловий насос повітря-рідина може бути переключеним на утилізацію теплоти повітря, що виходить через систему вентиляції, для розвантаження системи гарячого водопостачання, шляхом попереднього холодної води від 5 °C до 11 °C. При цьому для системи гарячого водопостачання економиться не менше 18% теплової енергії, і як наслідок – палива.

Таким чином, використання розробленої технології підвищить енергоефективність системи кондиціонування та гарячого водопостачання будівлі в теплий період.

## V. ВИСНОВКИ

Обґрунтовано технології застосування комплексних теплонасосних систем для опалення, кондиціонування та гарячого водопостачання житлових будівель. Розроблена автоматизована методика визначення раціональних параметрів для реалізації даних технологій. Отримано наступні положення.

1. Використовуючи розроблену автоматизовану методику розрахунку було проаналізовано та визначено, що застосування ґрунтового теплового насосу системи водного опалення з метою кондиціонування будівлі дозволить заощадити в теплий період від 13% до 18% умовного палива в порівнянні зі схемою кондиціонер з тепловим акумулятором.

2. Застосування теплового насосу повітря-рідина в теплий період замість теплового акумулятору для гарячого водопостачання дозволяє окремо в межах системи отримати подвійну економію умовного в теплий період, та до 18% економії в холодний період.

3. Розроблена технологія дозволяє обчислювати раціональні значення конструктивних та режимних



параметрів вихідної ґрунтової системи теплонасосно-го опалення для ефективного використання з метою кондиціонування будівлі та гарячого водопостачання в теплий період року.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Vincenzo Bianco, Federico Scarpa, Luca A. Tagliafico. Estimation of primary energy savings by using heat pumps for heating purposes in the residential sector. *Applied Thermal Engineering*. 2017. Vol. 114. P. 938-947. URL: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.12.058>
- [2] Олишевский Г. С., Олишевский И. Г. Обоснование применения теплонасосного оборудования для утилизации тепловых потерь в силовых трансформаторах большой мощности. *Вісник Дніпропетровського університету. Серія: Ракетно-космічна техніка. / Дніпр. нац. ун-т ім. О. Гончара. – Дніпропетровськ, 2015. – № 4. – Т. 23. – Вип. 18(1) – С. 131-136.* URL: <http://rocketspace.dp.ua/index.php/rst/issue/view/4>
- [3] Олишевский Г. С., Олишевский И. Г. Обоснование рациональной технологии утилизации теплоты системы кондиционирования для горячего водоснабжения. *Вісник Дніпропетровського університету. Серія: Ракетно-космічна техніка. 2019. № 4. Т. 27. вип. 22. С. 35–41.* URL: <http://rocketspace.dp.ua/index.php/rst/issue/view/1/7>
- [4] Олишевский Г. С., Олишевский И. Г. Рациональные технологии утилизации теплоты системы вентиляции для теплотехнических систем здания. *Вісник Дніпропетровського університету. Серія: Ракетно-космічна техніка. 2020. № 4. Т. 28. вип. 22. С. 164–175.* URL: <http://rocketspace.dp.ua/index.php/rst/issue/view/8>
- [5] Разумный Ю. Т., Заїка В. Т., Степаненко Ю. В. Энергозбереження: навч. посіб. Дніпропетровськ: Издательство Нац. гірн. ун-ту, 2005. 166 с.
- [6] Xiaodong Cao, Xilei Dai, Junjie Liu, Building energy-consumption status worldwide and the state-of-the-art technologies for zero-energy buildings during the past decade, *Energy and Buildings* (2016), <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.06.089>
- [7] Сканава А.Н., Махов Л.М.: Отопление: Учебник для вузов.-М.: Издательство АСВ, 2008.-576 с.: ил.
- [8] Корчемний М. Энергозбереження в агропромисловому комплексі [Текст] / М. Корчемний, В. Федорейко, В. Щербань. – Тернопіль: Вид-во: Підручники і посібники, 2001. – 976 с.
- [9] Теплотехника: Учебник для студентов вузов / Т. 34 А.М. Архаров, С.И. Исаев, И.А. Кожин и др.; Под общ. ред. В.И. Крутова. – М.: Машиностроение, 1986.–432 с.: ил.
- [10] E.M. Ryan, T.F. Sanquist, Validation of building energy modeling tools under idealized and realistic conditions, *Energy Buildings* (2012), doi:10.1016/j.enbuild.2011.12.020
- [11] Wang, Z., Luo, M., Geng, Y., Lin, B., & Zhu, Y. (2018). A model to compare convective and radiant heating systems for intermittent space heating. *Applied Energy*, 215, 211-226. doi:10.1016/j.apenergy.2018.01.088
- [12] Luis Perez-Lombard, Jose Ortiz, Juan F. Coronel, Ismael R. Maestre, A review of HVAC systems requirements in building energy regulations, *Energy Buildings* (2010), doi:10.1016/j.enbuild.2010.10.025
- [13] Christoph F. Reinhart, Carlos Cerezo Davila, Urban building energy modeling – A review of a nascent field, *Building and Environment*, Volume 97, 2016, Pages 196-202, ISSN 0360-1323, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.12.001>
- [14] Gorev V. N. Plasma kinetic coefficients with account for relaxation processes/ V. N. Gorev, A. I. Sokolovsky // *International Journal of Modern Physics B*. – 2015. – V. 29, 1550233
- [15] Gorev V. N. Generalization of the Grad method in plasma physics / V. N. Gorev, A. I. Sokolovsky// *Condensed Matter Physics*. – 2017. – V. 20, No. 2, 23001
- [16] Papaika, Y., Lysenko, O., Koshelenko, Y. and Olishivskyi, I., 2021. Mathematical modeling of power supply reliability at low voltage quality. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (2), pp.97-103. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-2/097>

*Стаття надійшла до редакції 12.08.2021*

## АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ НЕТРАДИЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ОТОПЛЕНИЯ И КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ЗДАНИЙ

ОЛИШЕВСКИЙ И.Г. аспирант группы 151А-19-2, НТУ «Днепропетровская политехника», Днепр, Украина, e-mail: [olishevskiyih@gmail.com](mailto:olishevskiyih@gmail.com);

ОЛИШЕВСКИЙ Г.С. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры электроэнергетики НТУ «Днепропетровская политехника», Днепр, Украина, e-mail: [olishevskiyg@ukr.net](mailto:olishevskiyg@ukr.net);

**Цель работы.** Разработать автоматизированную методику расчета параметров для теплонасосных систем отопления, кондиционирования и горячего водоснабжения применяемых в бытовых условиях при нестандартных потоках передачи тепловой энергии.

**Методы исследования.** Математическое моделирование термодинамических процессов протекающих в системах отопления, кондиционирования и горячего водоснабжения.

**Полученные результаты.** Обоснована и разработана автоматизированная методика расчета параметров нетрадиционной технологии, использующей стандартное теплонасосное оборудование водяного отопления для режима охлаждения воздуха в теплый период и сброса отводимой теплоты в грунт, а для нужд горячего водоснабжения тепловой насос воздух-жидкость, работающий в качестве скоростного водонагревателя.

Сделана оценка разработанных ранее авторами технологий утилизации тепловой энергии в зданиях. Первая технология предусматривает применение схемы с тепловым насосом и тепловым аккумулятором в холодный период и позволяет уменьшить расходы условного топлива в два раза по сравнению с газовой колонкой для горячего водоснабжения на том же объекте. Вторая технология предусматривает утилизацию теплоты с помощью теплового аккумулятора в комплексной системе кондиционирования и горячего водоснабжения в теплый период, что позволяет сэкономить от 74 % до 82 % условного топлива по сравнению со схемой с котлом и кондиционером без теплового аккумулятора.

Сделаны критические выводы о необходимости применения для этих технологий дополнительного нового габаритного оборудования и избыточном количестве получаемой горячей воды. Проанализированы возможности реализации такой схемы. Сделаны аналитически обоснованные рекомендации насчет конструкции (орегерение поверхностей) отопительных приборов и параметров режимов их эксплуатации в холодный и теплый (необходимость поперечного обдува) периоды года. При этом соблюдались неизменность площадей теплообмена отопительных приборов и базового расхода воды в системе отопления. Обоснована необходимость в регулировании режима кондиционирования путем изменения расхода воды в системе для поддержания постоянной комфортной температуры внутреннего воздуха при колебаниях внешней температуры.

**Научна новизна.** Впервые уделяется внимание исследованиям нетрадиционных способов применения теплонасосного оборудования с целью отопления, кондиционирования и горячего водоснабжения жилых помещений. Разработана автоматизированная методика определения рациональных параметров для данных технологий.

**Практическая ценность.** Разработана автоматизированная методика формирования управляющей зависимости массового расхода воды в системе от температуры наружного воздуха из условия постоянства заданной комфортной температуры внутреннего воздуха. Проанализировано применение воздушного теплового насоса для горячего водоснабжения в теплый период и отмечены высокие коэффициенты преобразования энергии (14...22). Обоснована экономия условного топлива от применения рассмотренной технологии от 13% до 18% по сравнению с технологией, использующей тепловой аккумулятор.

**Ключевые слова:** Автоматизированная методика; тепловой насос; отопление; горячее водоснабжение; кондиционирование; экономия топлива.

## AUTOMATED METHOD OF CALCULATION OF PARAMETERS FOR NON-TRADITIONAL HEATING TECHNOLOGIES AND CONDITIONING OF BUILDINGS

OLISHEVSKIY I.H. graduate student of group 151A-19-2, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine, e-mail: olishevskiyih@gmail.com;

OLISHEVSKIY H.S. PhD, docent of the Department of Power Engineering, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine, e-mail: olishevskiyg@ukr.net;

**Purpose.** Develop an automated method for calculating parameters for heat pump systems for heating, air conditioning and hot water supply, designed for use in domestic conditions with non-standard heat transfer flows.

**Methodology.** Mathematical modeling of thermodynamic processes occurring in heating, air conditioning and hot water supply systems.

**Findings.** The automated method of calculating the parameters of non-traditional technology, which uses standard heat pump equipment of the water heating system for the cooling mode of the air in the warm period of the year, and the discharge of heat dissipated into the ground, was substantiated and developed; and for the needs of hot water supply heat pump air-liquid, acting as a high-speed water heater.

The estimation of technologies of the thermal energy utilization in buildings developed earlier by authors is executed. The first technology involved the use of a heat pump and heat accumulator scheme in the cold season, and halved the consumption of conventional fuel compared to a gas column for hot water at the same facility. The second technology involved heat recovery with the help of a heat accumulator in a complex system of air conditioning and hot water supply in the warm period, which saves from 74 to 82% of conventional fuel compared to the scheme with boiler and

air conditioner without heat accumulator.

Critical conclusions were drawn about the need to use additional dimensional equipment for these technologies and the excess amount of hot water received. Possibilities of realization of such scheme were analyzed. Analytically substantiated recommendations on the design (ribbing of heat exchange surfaces) of heating devices and parameters of their operating modes in the cold and warm periods of the year were given. The condition of invariance of heat exchange areas of heating devices and basic water consumption in the heating system was fulfilled. The need to regulate the air conditioning regime by changing the water flow in the system to maintain a constant indoor air temperature with fluctuations in outdoor air temperature was substantiated.

**Originality.** For the first time, attention is paid to the study of non-traditional methods of using heat pump heating for heating, air conditioning and hot water supply of residential premises. The automated method for determining rational parameters for these technologies was developed.

**Practical value.** The automated method of forming the control dependence of the mass flow of water in the system on the outside air temperature on the condition of constancy of the set comfortable indoor air temperature was developed. The use of air-liquid heat pump for hot water supply in the warm period was analyzed, a high energy conversion factor was noted (14 ... 22). The savings of conventional fuel from the application of the considered technology from 13% to 18% in comparison with the technology using a heat accumulator were substantiated.

**Keywords:** Automated methodology; heat pump; heating; hot water supply; air conditioning; fuel economy.

## REFERENCES

- [1] Vincenzo Bianco, Federico Scarpa, Luca A. (2017). Tagliafico. Estimation of primary energy savings by using heat pumps for heating purposes in the residential sector. *Applied Thermal Engineering*. Vol. 114. P. 938-947. URL: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.12.058>
- [2] Olishevskij, G. S., Olishevskij, I. G. (2015). Obosnovanie primeneniya teplonasosnogo oborudovaniya dlja utilizacii teplovyh poter' v silovyh transformatorah bol'shoj moshnosti. *Visnik Dnipropetrovs'kogo universitetu*. Serija: Raketno-kosmichna tehnika. / Dnipr. nac. un-t im. O. Gonchara, Dnipropetrovs'k, No 4, 23, Vip. 18(1), 131-136. URL: <http://rocketspace.dp.ua/index.php/rst/issue/view/4>
- [3] Olishevskij, G. S., Olishevskij, I. G. (2019). Obosnovanie racional'noj tehnologii utilizacii teploty sistemy kondicionirovaniya dlja gorjachego vo-dosnabzhenija. *Visnik Dnipropetrovs'kogo univer-sitetu*. Serija: Raketno-kosmichna tehnika. No 4, Vol. 27, 22, 35–41. URL: <http://rocketspace.dp.ua/index.php/rst/issue/view/1/7>
- [4] Olishevskij, G. S., Olishevskij, I. G. (2020). Racional'nye tehnologii utilizacii teploty sistemy ventiljacii dlja teplotehnicheskikh sistem zdaniya. *Visnik Dnipropetrovs'kogo universitetu*. Serija: Raketno-kosmichna tehnika. No 4, Vol. 28, 22, 164–175. URL: <http://rocketspace.dp.ua/index.php/rst/issue/view/8>
- [5] Razumnij Ju. T., Zaïka V. T., Stepanenko Ju. V. (2005). *Energozberezhennja: navch. posib. Dnipropetrovs'k: Izdatel'stvo Nac. girn. un-tu*, 166 s.
- [6] Xiaodong Cao, Xilei Dai, Junjie Liu, (2016). Building energy-consumption status worldwide and the state-of-the-art technologies for zero-energy buildings during the past decade, *Energy and Buildings*, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.06.089>
- [7] Skanavi, A.N., Mahov, L.M. (2008). *Otoplenie: Uchebnik dlja vuzov*, Moscow, Izdatel'stvo ASV, 576.
- [8] Korchemnij, M., Fedorejko, V., Shherban, V. (2011). *Energozberezhennja v agropromi-slovomu kompleksi [Tekst]*. Ternopil': Vid-vo: Pidruchniki i posibniki, 976 s.
- [9] Arharov, A.M., Isaev, S.I., Kozhinov, I.A. (1986). *Teplotehnika: Uchebnik dlja studentov vtuzov*. Vol. 34. Moscow, Mashinostroe-nie, 432.
- [10] E.M. Ryan, T.F. Sanquist, (2012). Validation of building energy modeling tools under idealized and realistic conditions, *Energy Buildings*, doi:10.1016/j.enbuild.2011.12.020
- [11] Wang, Z., Luo, M., Geng, Y., Lin, B., & Zhu, Y. (2018). A model to compare convective and radiant heating systems for intermittent space heating. *Applied Energy*, 215, 211-226. doi:10.1016/j.apenergy.2018.01.088
- [12] Luis Perez-Lombard, Jose Ortiz, Juan F. Coronel, Ismael R. Maestre, A review of HVAC systems requirements in building energy regulations, *Energy Buildings* (2010), doi:10.1016/j.enbuild.2010.10.025
- [13] Christoph F. Reinhart, Carlos Cerezo Davila, (2016). Urban building energy modeling – A review of a nascent field, *Building and Environment*, Vol. 97, 196-202, ISSN 0360-1323, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.12.001>
- [14] Gorev, V. N., Sokolovsky, A. I. (2015). Plasma kinetic coefficients with account for relaxation processes. *International Journal of Modern Physics B*. Vol. 29, 1550233
- [15] Gorev V. N. (2017). Generalization of the Grad method in plasma physics / V. N. Gorev, A. I. Sokolovsky// *Condensed Matter Physics*. Vol. 20, No. 2, 23001
- [16] Papaïka, Y., Lysenko, O., Koshelenko, Y. and Olishevskiy, I., (2021). Mathematical modeling of power supply reliability at low voltage quality. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (2), pp.97-103. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-2/097>