

Электротехника и
электроэнергетика

Електротехніка та
електроенергетика

Electrical Engineering
and Power Engineering



2'2018

ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ



Науковий журнал

ЕЛЕКТРОТЕХНІКА та ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА

№2'2018

*Засновано Запорізьким національним технічним університетом
у травні 1999 року*

Виходить 4 рази на рік

Запоріжжя

2018

Головний редактор д-р техн. наук
Яримбаш Д.С.

Заст. гол. редактора д-р техн. наук
Тіховод С.М.

Відповідальний секретар канд. техн. наук
Коцур М. І.

ЗАКОРДОННІ ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ
КОЛЕГІЇ

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, Кардіфф, 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 № 1328 від 21.12.2015р.)

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; **Міліх 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., Запорізький національний технічний університет, м. Запоріжжя, Україна; **Зіновкін В. В.**, д-р техн. наук, проф., Запорізький національний технічний університет, 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., Запорізький національний технічний університет, м. Запоріжжя, Україна; **Яримбаш С. Т.**, канд. техн. наук, доц., Запорізький національний технічний університет, м. Запоріжжя, Україна; **Шило Г. М.**, д-р техн. наук, доц., Запорізький національний технічний університет, м. Запоріжжя, Україна; **Фурманова Н. І.**, канд. техн. наук, доц., Запорізький національний технічний університет, м. Запоріжжя, Україна; **Пархомеико А. В.**, канд. техн. наук, доц., Запорізький національний технічний університет, 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.

Журнал включено до міжнародних наукометричних баз: РИНЦ; каталогів та систем пошуку: 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.

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

Видавець: Запорізький національний технічний університет, м. Запоріжжя. Свідчення суб'єкта видавничої справи ДК №2394 від 27.12.2005р.

Реєстрація журналу: Журнал зареєстровано у Міністерстві юстиції України. Свідчення про державну реєстрацію КВ №6905 від 29.01.2003р.

Адреса редакції: Редакційно-видавничий відділ. Запорізький національний технічний університет, вул. Жуковського, 64, м. Запоріжжя, 69063, Україна. Телефон: +380(61)769-82-96 Факс: (061) 764-21-41 e-mail: rrvv@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 25.09.2018 за рекомендацією вченої ради Запорізького національного технічного університету (протокол №11 від 25.06.2018 р.). Формат 60x84/8. Ум. Др. Арк. 6,28. Тираж 300 прим. Зам. №994

ZAPORIZHZHIA NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY



Scientific journal

ELECTRICAL ENGINEERING & POWER ENGINEERING

№2'2018

Founded by Zaporizhzhia National Technical University in May 1999

4 issues per year

Zaporizhzhia

2018

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 № 1328
dated 21.12.2015)*

FOREIGN MEMBERS OF EDITORIAL BOARD

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, PhD., 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 National Technical University, Zaporizhzhia, Ukraine; **V.V. Zinovkin**, Sc.D., prof., Zaporizhzhia National Technical 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 National Technical University, Zaporizhzhia, Ukraine; **S. T. Yarymbash**, Ph.D, assoc. prof., Zaporizhzhia National Technical University, Zaporizhzhia, Ukraine; **G. M. Shilo**, Sc.D., assoc. prof., Zaporizhzhia National Technical University, Zaporizhzhia, Ukraine; **N. I. Furmanova**, Ph.D., assoc. prof., Zaporizhzhia National Technical University, Zaporizhzhia, Ukraine; **A. V. Parkhomenko**, Ph.D., assoc. prof., Zaporizhzhia National Technical 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;

The journal included in the international scientometric databases: Index Copernicus Journals Master List; Inspec; PIHL; catalogs and search systems: CrossRef; Directory of Open Access Journals (DOAJ); Google Academy; OpenAIRE; Public Knowledge Project (PKP); ResearchBib - Academic Resource 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.

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

Founder and editor: Zaporizhzhia National Technical University, Zaporozhia. Certificate of publisher Civil Code №2394 dated 27.12.2005.

Journal was registered: by the Ministry of Justice of Ukraine. Registration number KV № 6905 dated January 29, 2003.

Address of editor and editorial office: Zaporizhzhia National Technical 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

Computer layout Dyachenko O.O. Editor of English texts Voitenko S.V. The journal was signed on September 25, 2018 on the recommendation of the academic council of the Zaporizhzhia National Technical University (Protocol No. 11 dated June 25, 2018). Sheet size 60x84/8. Cond. Print. Sheets 6,28. Number of copies printed 300. Rep. № 994

ЗМІСТ

I ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

Дівчук Т.Є., Яримбаш Д.С., Яримбаш С.Т., Килимник І.М., Коцур М.І., Безверхня Ю.С. УТОЧНЮЮЧИЙ ПІДХІД ДО ВИЗНАЧЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ ВІДНОСНИХ МАГНІТНИХ ПРОНИКНОСТЕЙ АНІЗОТРОПНИХ ХОЛОДНОКАТАНИХ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ СТАЛЕЙ.....	8
Черноусенко О.Ю., Бутовський Л.С., Нікуленкова Т.В., Беднарська І.С. ГРАНИЧНІ УМОВИ ТЕПЛООБМІНУ В КІНЦЕВИХ УЩІЛЬНЕННЯХ ЦВТ ТА ЦНТ ТУРБІНИ К-1000-60/3000.....	18

II ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА

Альохіна С.В. УМОВИ ТЕПЛООБМІНУ В КОНТЕЙНЕРІ СУХОГО ЗБЕРІГАННЯ ВІДПРАЦЬОВАНОВОГО ЯДЕРНОГО ПАЛИВА ЕНЕРГЕТИЧНИХ РЕАКТОРІВ.....	29
Луцин С.П., Борковських А.В., Борковських М.В. АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ІННОВАЦІЙНИХ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИХ ПРОВОДІВ ДЛЯ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ.....	39
Шкрабець Ф.П., Бердник В.В. КОМБІНОВАНА МОБІЛЬНА СИСТЕМА ОСНОВНОГО І РЕЗЕРВНОГО ЖИВЛЕННЯ ЛЕКТРОСПОЖИВАЧІВ МАЛОЇ ТА СЕРЕДНЬОЇ ПОТУЖНОСТІ.....	47

СОДЕРЖАНИЕ

I ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Дивчук Т.Е., Ярымбаш Д.С., Ярымбаш С.Т., Килимник И.М., Коцур М.И., Безверхняя Ю.С. УТОЧНЯЮЩИЙ ПОДХОД К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ ПРОНИЦАЕМОСТЕЙ АНИЗОТРОПНЫХ ХОЛОДНОКАТАНЫХ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СТАЛЕЙ.....	8
Черноусенко О.Ю., Бутовский Л.С., Никуленкова Т.В., Беднарская И.С. ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ ТЕПЛООБМЕНА В КОНЦЕВЫХ УПЛОТНЕНИЯХ ЦВД И ЦНД ТУРБИНЫ К-1000- 60/3000.....	18

II ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

Алёхина С. В. УСЛОВИ ТЕПЛООБМЕНА В КОНТЕЙНЕРЕ СУХОГО ХРАНЕНИЯ ОТРАБОТАВШЕГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕАКТОРОВ.....	29
Луцин С.П., Борковских А.В., Борковских М.В. АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ИННОВАЦИОННЫХ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ПРОВОДОВ ДЛЯ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ.....	39
Шкрабец Ф.П., Бердник В.В. КОМБИНИРОВАННАЯ МОБИЛЬНАЯ СИСТЕМА ОСНОВНОГО И РЕЗЕРВНОГО ПИТАНИЯ ЭЛЕКТРОПОТРЕБИТЕЛЕЙ МАЛОЙ И СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ.....	47

CONTENTS

I ELECTRICAL ENGINEERING

Divchuk T.E., Yarymbash D.S., Yarymbash S.T., Kylymnyk I.M., Kotsur M.I., Bezverkhnia Yu.S. AN ADJUSTING APPROACH TO THE DETERMINATION OF THE PERMEABILITY FUNCTIONAL DEPENDENCIES OF ANISOTROPIC COLD-ROLLED ELECTROTECHNICAL STEELS.	8
---	---

Chernousenko O. Yu., Butovskyi I.S., Nikulenkova T. Y., Bednarska I.S. BOUNDARY CONDITIONS OF HEAT EXCHANGE IN THE LACE SEALS OF CYLINDERS OF HIGH AND LOW PRESSURE OF TURBINE K-1000-60 / 3000.	18
---	----

II POWER ENGINEERING

Alyokhina S. HEAT EXCHANGE CONDITIONS IN THE DRY STORAGE CONTAINER FOR SPENT NUCLEAR FUEL OF POWER REACTORS.	29
---	----

Lushchin S.P., Borkovskih A.V., Borkovskih M.V. ANALYSIS OF ELECTROTECHNICAL PROPERTIES OF INNOVATIVE HIGH-TEMPERATURE WIRES FOR OVERHEAD POWER TRANSMISSION LINES.	39
--	----

Shkrabets F.P., Berdnyk V.V. COMBINED MOBILE POWER SYSTEM FOR THE STANDBY POWER SUPPLY OF THE LOW AND AVERAGE ELECTRICAL FACILITIES.	47
---	----

УДК 621.3.013.1

УТОЧНЮЮЧИЙ ПІДХІД ДО ВИЗНАЧЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ ВІДНОСНИХ МАГНІТНИХ ПРОНИКНОСТЕЙ АНІЗОТРОПНИХ ХОЛОДНОКАТАНИХ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ СТАЛЕЙ

ДІВЧУК Т.Є.

старший викладач кафедри електричних машин Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, Україна, e-mail: DIV2009@i.ua;

ЯРИМБАШ Д.С.

д-р техн. наук, доцент, завідувач кафедри електричних машин Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, Україна, e-mail: yarymbash@gmail.com;

ЯРИМБАШ С.Т.

канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електричних машин Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, Україна, e-mail: kstj06@gmail.com;

КИЛИМНИК І.М.

канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри вищої математики Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, Україна, e-mail: dnukim76@gmail.com;

КОЦУР М.І.

канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електричних та електронних апаратів Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, Україна, e-mail: kotsur8@gmail.com;

БЕЗВЕРХНЯ Ю.С.

аспірант кафедри електричних та електронних апаратів Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, Україна, e-mail: juliaeee@ukr.net.

Мета роботи. Розробити ефективний підхід до визначення математичних функціональних співвідношень для високоточного опису нелінійних залежностей відносної магнітної проникності від індукції магнітного поля із врахуванням анізотропії сучасних марок холоднокатаних електротехнічних сталей, що застосовуються у виробництві нових серій силових трансформаторів.

Методи дослідження. Дослідження проводилися із застосуванням методів інтерполяції, апроксимації, регресійного аналізу, математичної фізики, теорії електромагнітного поля.

Отримані результати. Проведені дослідження методів функціонального представлення нелінійних характеристик намагнічування феромагнітних матеріалів, у тому числі, холоднокатаних анізотропних електротехнічних сталей. Запропонований уточнюючий підхід до збільшення розмірності вихідних даних на основі методу сплайн-інтерполяції на базисі поліномів Ерміта для цифрованих даних характеристик намагнічування, що виключає збільшення похибок визначення відносних магнітних проникностей на ділянках між вузловими значеннями магнітної індукції. Для математичного опису залежностей відносної магнітної проникності від індукції магнітного поля розроблений спеціальний функціональний базис із функціями Гауса і додатковими функціями похибок, що забезпечує безперервність похідних різних порядків при фіксованих значень кутів між напрямом прокатування анізотропної електротехнічної сталі та магнітного потоку. Застосовано метод нелінійної регресії у структурі вбудованих функцій прикладного пакету MathCAD для високоточного визначення векторів коефіцієнтів регресії у функціональних описах відносних магнітних проникностей. Шляхом верифікації і валідації результатів уточнюючої нелінійної регресії із даними розрахунків за узагальненою методикою та з експериментальними даними доводиться істотне зменшення відносних похибок, що не перевищують 1,62% при фіксованих значень кутів між напрямом прокатування анізотропної електротехнічної сталі та магнітного потоку. Застосування нових рівнянь регресії істотно покращує умови для польового моделювання електромагнітних полів у режимі неробочого ходу силового трансформатора в структурі засобів Comsol Multiphysics, забезпечуючи стійкість ітераційних обчислювальних процесів.

Наукова новизна. Реалізований новий підхід до збільшення розмірності вхідних масивів на основі сплайн-інтерполяції масивів цифрованих даних характеристик намагнічування для фіксованих значень кутів між напрямом прокатування електротехнічної сталі і магнітного потоку. Для рівнянь нелінійної регресії розроблений новий функціональний базис із функціями Гауса та додатковими функціями похибок для математичних описів із безперервними похідними для залежностей відносних магнітних проникностей анізотропних холоднокатаних електротехнічних сталей від індукції магнітного поля із високою точністю в інтервалі зміни кутів між напрямом прокатування та магнітного потоку від 0° до 90° .

Практична цінність. Запропоновані у роботі підходи і методики для базису функцій Гауса і додаткових функцій похибок дозволяють істотно підвищити точність визначення нелінійних характеристик анізотропних електротехнічних сталей і зменшити відносні похибки до 1,62% при зміні кутів між напрямками прокатування та магнітного потоку від 0° до 90° .

Ключові слова: характеристики намагнічування; анізотропія; відносна магнітна проникність, сплайн-інтерполяція, функціональний базис, метод нелінійної регресії, електромагнітне поле

I. ВСТУП

Комплексне вирішення питання енергоефективності та енергоощадності при транспортуванні і розподілі електричної енергії потребує створення нових типів трансформаторного обладнання із покращеними параметрами і характеристиками, насамперед, параметрами неробочого ходу. До параметрів неробочого ходу відносять втрати і струм неробочого ходу, що визначаються як паспортні дані на етапі конструкторської підготовки виробництва а також під час випробувань силових трансформаторів [1], [2].

Підвищення точності проектування обумовлює застосування нових удосконалених підходів, що базуються на даних дослідження електромагнітних процесів у силових трансформаторах засобами математичного моделювання із застосуванням спеціалізованого програмного забезпечення і високоресурсної обчислювальної техніки [3]–[6]. Найбільше розповсюдження для польового моделювання електромагнітних полів у силових трансформаторах отримали сучасні спеціалізовані пакети комп'ютерних програм: Ansys [8], Comsol Multiphysics [7], Femm [9] та інші. Для чисельного моделювання у структурі засобів усіх зазначених програм необхідно визначити вихідний функціональний вигляд залежностей відносно магнітної проникності анізотропної холоднокатаної електротехнічної сталі від модуля індукції магнітного поля і кутів між напрямками магнітного потоку і прокатування. Саме точність такого визначення буде впливати на точність розрахунків параметрів неробочого ходу трансформаторного обладнання. Тому розробка високоточних математичних описів нелінійних залежностей для магнітних властивостей анізотропних рулонних електротехнічних сталей визначається, як актуальна задача для теоретичної електромеханіки і для практики конструкторської підготовки виробництва нових серій силових трансформаторів.

II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Експериментальні нелінійні магнітні властивості для анізотропних електротехнічних сталей, як правило, наводять у графічній формі у вигляді кривих намагнічування (Рис.1) [10]:

$$\begin{cases} H = H(B)_{\alpha=0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ}; \\ B = B(H)_{\alpha=0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ} \end{cases} \quad (1)$$

де H , B – модулі векторів напруженості та індукції магнітного поля, $\{\alpha = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ\}$ –

кути між напрямками магнітного потоку і прокатування.

Для математичного представлення нелінійних залежностей характеристик намагнічування (1) було реалізовано багато підходів із функціями різних видів [11]–[13], а саме: дрібно-лінійними, експоненціальними і логарифмічними функціями, гіперболічними функціями і функціями з арктангенсами, поліноміальними і степеневими функціями з експоненціальними поправками, функціями з рядами Фур'є, кусково-лінійними та кусково-поліноміальними функціями. Значна кількість даних підходів і різних видів функцій пов'язана із прагненням до підвищення точності математичних описів на характерних ділянках кривих намагнічування відповідних марок феромагнітних матеріалів і електротехнічних сталей за відсутності потреби їх узагальнення.

Питання узагальнення математичних описів кривих намагнічування були розроблені у роботах відомих авторів [14], [15]. Це вимагає, з однієї сторони, представлення кривих намагнічування у вигляді добутку виду:

$$B = \mu_o \cdot \mu(H) \cdot H, \quad (2)$$

а, з іншої сторони, унормування залежності

$$\mu = \mu(H) \quad (3)$$

із перетворенням до безрозмірного виду:

$$\mu_* = \mu_*(H_*) \quad (4)$$

з нормуючими співвідношеннями:

$$\mu_* = \frac{\mu}{\mu_{\max}}; H_* = \frac{H}{H_{\text{norm}}} \quad (5)$$

де

$$\begin{aligned} \mu_{\max} &= \max[\mu(H)]_{0 \leq H < \infty}; \\ \mu(H_{\text{norm}}) &= \mu_{\max} \end{aligned} \quad (6)$$

Проте розглянуті вище окремі [12], [13] та узагальнюючі підходи (2) – (6) [14], [15] до математичного представлення нелінійних залежностей магнітних властивостей анізотропних електротехнічних сталей (1) не повною мірою відповідають вимогам польового моделювання змінних у часі процесів електромагнітного перетворення енергії у магнітних системах силових трансформаторів. Це зумовлено особливостями алгоритмів та чисельної реалізації МСЕ, що реалізується у ПЗ, наприклад, Comsol Multiphysics, для мате-

матичної моделі магнітних властивостей у вигляді [8]:

$$H = B/\mu_0 \cdot \mu(B) \quad (7)$$

В окремому випадку представлення відносної магнітної проникності анізотропної холоднокатаної електротехнічної сталі за обґрунтованих у роботі [14] спрощень тензор магнітної проникності може мати вигляд:

$$\mu = \begin{vmatrix} \mu_x(B) & 1 & 1 \\ 1 & \mu_y(B) & 1 \\ 1 & 1 & \mu_z(B) \end{vmatrix} \quad (8)$$

а його компоненти визначаються умовними співвідношеннями виду [16 – 18]:

$$\mu_x(B) \cup \mu_y(B) \cup \mu_z(B) = \mu(B)_{\alpha=0} \cup \mu(B)_{\alpha=90}$$

Таким чином, вимоги до точності польового моделювання визначають потребу у високоточних математичних описах нелінійних залежностей відносної магнітної проникності від індукції магнітного поля B для відповідних ділянок магнітної системи силового трансформатора

III. МЕТА РОБОТИ

Метою роботи є розробка ефективного підходу до визначення математичних функціональних співвідношень для високоточного опису нелінійних залежностей відносної магнітної проникності від індукції магнітного поля із врахуванням анізотропії сучасних марок холоднокатаних електротехнічних сталей, що застосовуються у виробництві нових серій силових трансформаторів.

IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ І АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

У разі представлення ділянок анізотропних феромагнітних матеріалів ізотропними середовищами із нелінійними властивостями (1) необхідно визначити вектор функцій залежності відносної магнітної проникності від індукції магнітного поля [18]

$$\mu = \left\{ \mu_{0^0}(B), \mu_{15^0}(B), \mu_{30^0}(B), \mu_{45^0}(B), \mu_{60^0}(B), \mu_{90^0}(B) \right\} \quad (9)$$

компоненти якого мають відповідати компонентам вектора кутів між напрямками індукції і напрямом прокатування для експериментальних кривих намагнічування електротехнічної сталі (Рис. 1) [10]:

$$\alpha = (0^0, 15^0, 30^0, 45^0, 60^0, 90^0) \quad (10)$$

Для зменшення впливу суб'єктивних факторів у перетворенні графічних форм нелінійних кривих намагнічування [10] до цифрових масивів даних застосовується спеціалізована програма Graph2Digit із статусом freeware [19].

Для компонентів вектору функцій (9) і вектору

значень кутів (10) з кривими намагнічування (Рис. 1) необхідно поставити у відповідність парно зв'язані один з одним масиви дискретних значень напруженості та індукції магнітного поля:

$$\begin{aligned} &\{H_{0^0,i}\}, \{B_{0^0,i}\}, \{H_{15^0,i}\}, \{B_{15^0,i}\}; \\ &\{H_{30^0,i}\}, \{B_{30^0,i}\}, \{H_{45^0,i}\}, \{B_{45^0,i}\}; \\ &\{H_{60^0,i}\}, \{B_{60^0,i}\}, \{H_{90^0,i}\}, \{B_{90^0,i}\}, \end{aligned}$$

а також отримати комбінації масивів значень відносної магнітної проникності, що зв'язані з масивами значень магнітної індукції:

$$\begin{aligned} &\left\{ \begin{aligned} &\{B_{0^0,i}\}, \{\mu_{0^0,i}\}, \{B_{15^0,i}\}, \{\mu_{15^0,i}\}, \\ &\{B_{30^0,i}\}, \{\mu_{30^0,i}\}, \{B_{45^0,i}\}, \{\mu_{45^0,i}\}, \\ &\{B_{60^0,i}\}, \{\mu_{60^0,i}\}, \{B_{90^0,i}\}, \{\mu_{90^0,i}\}, \\ &\{\mu_{ji}\} = \{B_{ji} / \mu_0 \cdot H_{ji}\} \end{aligned} \right\} \quad (11) \end{aligned}$$

де індекс j відповідає компонентам вектора кутів (10), а індексом i позначається номер дискретного значення у масивах даних для відносних магнітних проникностей та індукцій.

Під час оцифрування графіків кривих намагнічування виникають похибки, які можуть істотно збільшуватися із збільшенням числа вузлових точок тому, що відстань між ними стає співрозмірною із товщиною кривих на графіках (Рис. 1). Для компенсування впливу зазначених факторів доцільно істотно зменшити кількість вузлових точок оцифрування і застосувати методи сплайн-інтерполяції, сплайн-апроксимації для збільшення розмірності масивів з цифровими даними (11) [20]–[22].

Для кожного інтервалу між дискретними значеннями індукції магнітного поля для функцій інтерполяції даних (11) необхідно здійснити унормування виду:

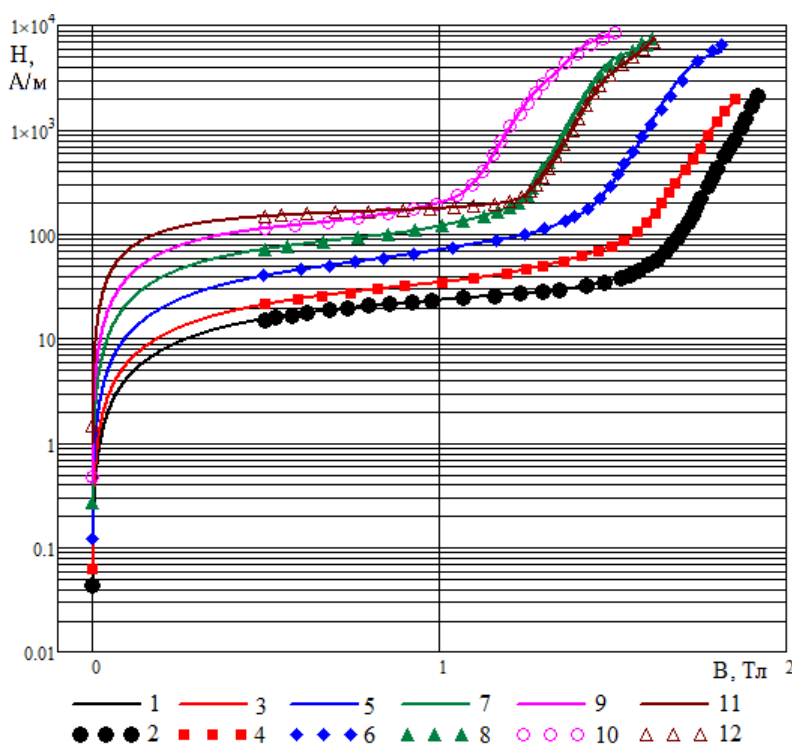
$$\beta = \frac{B - B_{ji}}{B_{ji+1} - B_{ji}}, B_{ji} \leq B \leq B_{ji+1}, 0 \leq \beta \leq 1.$$

Тоді функції інтерполяції кубічними сплайнами для кожної пари зв'язаних масивів даних з (11) можна об'єднати у систему:

$$\begin{aligned} &\left\{ \begin{aligned} &f_{\mu}(\beta)_j = v_0(\beta)\mu_j(B_{ji}) + v_1(\beta)\mu_j(B_{ji+1}) + \\ &+ \gamma_{ji}v_2(\beta)(B_{ji+1} - B_{ji}) + \\ &+ \gamma_{ji+1}v_3(\beta)(B_{ji+1} - B_{ji}) \end{aligned} \right\}, \quad (12) \end{aligned}$$

де базисні поліноми Ерміта третього ступеня мають вид [23]:

$$\begin{aligned} &\left\{ \begin{aligned} &v_0(\beta) = (2\beta + 1) \cdot (1 - \beta^2), v_1(\beta) = (3 - 2\beta) \cdot \beta^2, \\ &v_2(\beta) = \beta \cdot (1 - \beta)^2, v_3(\beta) = (\beta - 1) \cdot \beta^2, \end{aligned} \right\} \quad (13) \end{aligned}$$



1 – кубічна сплайн-інтерполяція (кут 0°); 2 – цифрові дані (кут 0°); 3 – кубічна сплайн-інтерполяція (кут 15°); 4 – цифрові дані (кут 15°); 6 – кубічна сплайн-інтерполяція (кут 30°); 6 – цифрові дані (кут 30°); 7 – кубічна сплайн-інтерполяція (кут 45°); 8 – цифрові дані (кут 45°); 9 – кубічна сплайн-інтерполяція (кут 60°); 10 – цифрові дані (кут 60°); 11 – кубічна сплайн-інтерполяція (кут 90°); 12 – цифрові дані (кут 90°)

Рисунок 1. Характеристики намагнічування анізотропної холоднокатаної електротехнічної сталі 3408 [9]

Для загального формулювання задачі інтерполяції [23]:

$$\left\{ \mu_j^{int}(B_{j,i}, \Gamma_j) = \mu_{j,i} \right. \quad (14)$$

необхідно визначити невідомі компоненти вектора $\{\Gamma_j = (\gamma_{j,0}, \gamma_{j,1}, \dots, \gamma_{j,n})\}$, що забезпечують мінімальну кривизну функцій інтерполяції (12) на ділянках між вузловими точками у зв'язаних парах масивів (11) і задовольняють умовам мінімізації функціоналів [24]:

$$\left\{ \min \left[\frac{\max(B_{j,i})}{\min(B_{j,i})} \left[\frac{d^2(\mu_j^{int}(B, \Gamma_j))}{dB^2} \right]^2 \right] dB \right\}. \quad (15)$$

Розв'язання задачі (14), (15) дозволяє поставити вектор функцій інтерполяції у відповідність вектору функцій (9) для масивів цифрованих даних (10), (11):

$$\mu^{int} = \left\{ \begin{array}{l} \mu_{0^0}^{int}(B, \Gamma_{0^0}), \mu_{15^0}^{int}(B, \Gamma_{15^0}), \mu_{30^0}^{int}(B, \Gamma_{30^0}), \\ \mu_{45^0}^{int}(B, \Gamma_{45^0}), \mu_{60^0}^{int}(B, \Gamma_{60^0}), \mu_{90^0}^{int}(B, \Gamma_{90^0}) \end{array} \right\} \quad (16)$$

Метод кубічної сплайн-інтерполяції дозволив запобігти, з однієї сторони, «розхитуванню» функцій інтерполяцій між вузловими точками [23], а, з іншої сторони, отримати функції інтерполяції із безпервними похідними $d(\mu^{int})/dB$. Тому метод кубічної сплайн-інтерполяції (14), (15) дозволяє без зростання похибок істотно збільшити розмірність масивів цифрованих даних

$$N = \dim(\tilde{B}_j) \gg \max \left\{ \begin{array}{l} \dim(B_{0^0,j}), \dim(B_{15^0,j}), \dim(B_{30^0,j}), \\ \dim(B_{45^0,j}), \dim(B_{60^0,j}), \dim(B_{90^0,j}) \end{array} \right\}$$

і забезпечити однакову розмірність масивів вхідних даних для кожного значення кута між вектором індукції магнітного поля і напрямом прокатування анізотропної електротехнічної сталі (10):

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta B_j = \frac{\max(B_{j,i}) - \min(B_{j,i})}{N}, \\ \tilde{B}_{j,k} = \min(B_{j,i}) + k \cdot \Delta B_j, \\ \mu_{j,k} = \mu_j^{int}(\tilde{B}_{j,k}, \Gamma_j), \\ j \in (0^0, 15^0, 30^0, 45^0, 60^0, 90^0) \end{array} \right. \quad (17)$$

Вектор функцій апроксимації масивів цифрованих даних (17) будується на базисі функцій Гауса від аргументу B^2 і додаткових функцій похибок [24] від аргументів (B^2, B) . Тоді компоненти вектора функцій (9) будуть представлені у вигляді:

$$\mu_j^{apr}(B) = \sum_{m=1}^3 G_{m,1}^j \cdot \exp\left[-G_{m,2}^j \cdot (B^2 - G_{m,3}^j)^2\right] + A_{j,0} + A_{j,1} \cdot \operatorname{erfc}(A_{j,2} \cdot B^2 - A_{j,3}) + A_{j,4} \cdot \operatorname{erfc}(A_{j,5} \cdot B - A_{j,6}) \quad (18)$$

Знаходження коефіцієнтів регресії у співвідношеннях (18) для цифрованих даних у масивах (17) здійснюється у структурі засобів MathCAD із застосуванням методів і вбудованої функції нелінійної регресії **genfit** [8], [25]. Точність рівнянь нелінійної регресії (18) визначається шляхом порівняння максимальних відносних похибок для системи функцій:

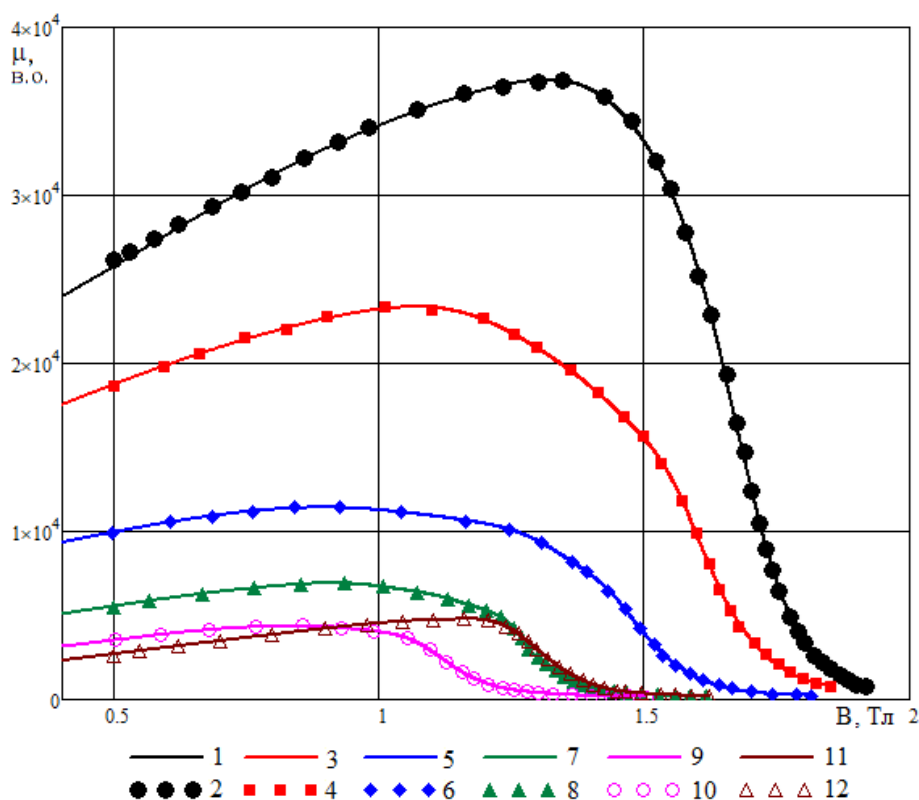
$$\left\{ \max \left(\left| \frac{\mu_j^{apr}(B_{j,i}) - \mu_{j,i}}{\max(\mu_{j,i})} \right| \cdot 100 \right) \right\} \quad (19)$$

для масивів цифрованих даних (11), а також для даних розрахунків за узагальненою методикою [15].

За узагальненою методикою [15] похибка розрахунків відносної магнітної проникності для анізотропної електротехнічної сталі 3408 поступово збільшується від 5,4% до 15% при збільшенні кута між напрямками магнітного потоку і прокатування від 0° до 90° (Табл. 1).

Похибка уточненої нелінійної регресії (19) є значно меншою і належить інтервалу 0,612...1,62%. Це забезпечує високий рівень збігу розрахункових даних для рівнянь нелінійної регресії (19) з вихідними цифрованими даними (11) (рис.2).

Додатковою перевагою уточненої нелінійної регресії із спеціальним базисом функцій (18) є відсутність точок розривів у похідних, що істотно покращує умови числової реалізації для польового моделювання у структурі засобів Comsol Multiphysics [15].



1 – уточнена нелінійна регресія (кут 0°); 2 – цифрові дані (кут 0°); 3 – уточнена нелінійна регресія (кут 15°); 4 – цифрові дані (кут 15°); 5 – уточнена нелінійна регресія (кут 30°); 6 – цифрові дані (кут 30°); 7 – уточнена нелінійна регресія (кут 45°); 8 – цифрові дані (кут 45°); 9 – уточнена нелінійна регресія (кут 60°); 10 – цифрові дані (кут 60°); 11 – уточнена нелінійна регресія (кут 90°); 12 – цифрові дані (кут 90°)

Рисунок 2. Валідація даних уточненої нелінійної регресії для відносної магнітної проникності анізотропної холоднокатаної електротехнічної сталі 3408

Таблиця 1. Порівняння точності розрахунків відносної магнітної проникності анізотропної електротехнічної сталі 3408

Значення кутів між напрямками прокатування і магнітного потоку на ділянках магнітної системи	Максимальна відносна похибка	
	Для узагальненої методики [8]	Для уточненої нелінійної регресії (18)
0°	1.619%	5.372%
15°	0.944%	7.390%
30°	0.637%	8.230%
45°	0.593%	11.082%
60°	0.939%	12.203%
90°	0.723%	15.008%

V. ВИСНОВКИ

На основі методу кубічної сплайн-інтерполяції розроблена методика збільшення розмірності цифрованих даних для характеристик намагнічування анізотропних холоднокатаних електротехнічних сталей, що виключає «розхитування» значень відносної магнітної проникності на ділянках між цифрованими даними і підвищує точність визначення коефіцієнтів регресії.

Для математичного опису із нерозривними похідними нелінійних залежностей відносної магнітної проникності анізотропної холоднокатаної електротехнічної сталі запропоновано спеціальний базис на основі лінійних комбінацій функцій Гауса і додаткових функцій похибок.

Уточнена методика математичного опису нелінійних залежностей відносної магнітної проникності на основі методу нелінійної регресії із спеціальним базисом функцій Гауса і додаткових функцій похибок дозволяє зменшити до 1,62% похибки розрахунків для всього інтервалу зміни магнітних індукцій і кутів між напрямками прокатування і магнітного потоку на ділянках магнітної системи трансформатора.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] Тихомиров, П. М. Расчет трансформаторов [Текст] / П. М. Тихомиров. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 528 с.
- [2] Kulkarni, S.V. Transformer Engineering: Design and Practice [Text] / S.V. Kulkarni, S.A. Khaparde. – New York: Marcel Dekker, 2004. – 478 p.
- [3] Tang, Q. Magnetic flux distribution in power transformer core with mitred joints [Text] / Q. Tang, Sh. Guo, Zh. Wang // Journal of Applied Physics – 2015. – Vol. 117, Iss. 17, – P. 17D522-1–17D522-4. DOI: 10.1063/1.4919119.
- [4] Rashtchi, V. Parameter identification of transformer detailed model based on chaos optimisation algorithm [Text] / V. Rashtchi, E. Rahimpour, E. M. Rezapour // IET Electric Power Applications – 2011.

– Vol 5, No. 2. – P. 238–246. DOI: 10.1049/iet-epa.2010.0147.

- [5] Пайков, И. А. Анализ моделей для электромагнитного расчета силовых трансформаторов [Текст] / И. А. Пайков, А. И. Тихонов // Вестник ИГЭУ – 2015. – №3. – С. 38-43.
- [6] Jazebi, S. Dual Reversible Transformer Model for the Calculation of Low-Frequency Transients [Text] / S. Jazebi, F. de León, A. Farazmand, D. Deswal // IEEE Transactions on Power Delivery – 2013. – Vol. 28, No. 4. – P. 2509–2517. DOI: 10.1109/TPWRD.2013.2268857.
- [7] Буль, О.Б. Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов. Программа ANSYS Учебное пособие для студентов вузов [Текст] / О. Б. Буль М.: Академия, 2006. – 288с.
- [8] Бутарев, И. Ю. Comsol multiphysics: Моделирование электромеханических устройств [Текст] / И. Ю. Бутарев, Л. А. Потапов. Брянск: Издательство Брянского государственного технического университета, 2011. – 113 с. – ISBN 978-5-89838-520-0
- [9] Буль О.Б. Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов. Магнитные цепи, поля и программа FEMM [Текст] / О.Б. Буль. – М.: Академия, 2005. – 336 с. – ISBN 5-7695-2064-7.
- [10] Молотилов, Б. В. Холоднокатаные электротехнические стали [Текст] / Б. В. Молотилов; Б.Г. Лившиц. – Москва: Металлургия, 1989. – 167 с.
- [11] Демиденко, Е.З. Линейная и нелинейная регрессия [Текст] / Е.З. Демиденко. – М: Финансы и статистика, 1981, 304 с.
- [12] Король, Е.Г. Анализ методов моделирования магнитных характеристик электромагнитов для компенсации магнитного поля электрооборудования [Текст] / Е. Г. Король // Електротехніка і Електромеханіка. – 2007. – №2. – с. 31-34.
- [13] Бессонов, Л. А. Электрические цепи со сталью [Текст] / Л. А. Бессонов. – М.: Госэнергоиздат, 1948. – 344 с.
- [14] Демирчан, К.С. Моделирование магнитных полей [Текст] / К.С. Демирчан. – Ленинград.: Энергия, 1974. – 288 с.
- [15] Пентегов, И.В. Универсальная аппроксимация кривых намагничивания электротехнических сталей [Текст] / И.В. Пентегов, А.В. Красножон. – Електротехніка і електромеханіка. – 2006. – №1. – С. 66-70.
- [16] Яримбаш Д. С. Особливості визначення параметрів короткого замикання силових трансформаторів засобами польового моделювання [Текст] / Д. С. Яримбаш, С. Т. Яримбаш, Т. Є. Дівчук, І. М. Килимник // Електротехніка та електроенергетика – 2016. – № 1. – С. 12-17. DOI: 10.15588/1607-6761-2016-1-2
- [17] Яримбаш Д. С. Особливості розподілення магнітних потоків у режимі неробочого ходу силових трансформаторів [Текст] / Д. С. Яримбаш, С. Т. Яримбаш, Т. Є. Дівчук, І. М. Килимник // Елек-

- тротехніка та електроенергетика – 2016. – № 2. – С. 5-12. DOI: 10.15588/1607-6761-2016-2-1.
- [18] Дивчук, Т. Е. Подход к определению токов холостого хода силовых трехфазных трансформаторов с плоскими стержневыми магнитными системами / Т. Э. Дивчук, Д. С. Ярымбаш, С. Т. Ярымбаш, И. М. Килимник, И. М. Коцур, Ю. С. Безверхняя // Електротехніка та електроенергетика. – 2017. – № 2. – С. 56-66. DOI: DOI: 10.15588/1607-6761-2017-2-6.
- [19] Graph2Digit: www.plsoft.su
- [20] Паньків, В.І. Апроксимація характеристик намагнічування трансформаторів струму [Текст] / В.І. Паньків, Є.М. Танкевич, М.М. Лутчин // Праці Інституту електродинаміки. – 2014. – Вип. 37. – с. 82-90.
- [21] В. Маляр, А. Апроксимація характеристик намагнічування електротехнічних сталей [Текст] / В. Маляр, А. Маляр, Д. Гречин // Теоретична електротехніка. – 2004. – Вип. 57. – С. 78-85.
- [22] Маляр, В.С. Апроксимація характеристик намагнічування електротехнічних сталей сплайнами другого порядку. [Текст] / В.С. Маляр, І.А. Добушовська // Електроенергетичні та електромеханічні системи. – 2010. – №671. – с. 67-72.
- [23] Жермен-Лакур, П. Математика и САПР: В 2-х кн. Кн. 1 Пер. с франц. [Текст] / П. Жермен-Лакур, П. Шенен, М. Коснар, И. Гардан, Ф. Робер, И. Робер, П. Витомски, П. Кастельжо. – М.: Мир, 1988. – 204 с., ISBN 5-03-000417-3, OCR.
- [24] Корн, Г. Справочник по математике (для научных работников и инженеров) [Текст] / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1977. – 830 с.
- [25] Алгоритмізація та програмування. MathCAD Підручник. [Текст] / Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2013. – 364 с.
- [26] Ярымбаш Д. С. Особенности определения параметров схемы замещения асинхронного двигателя для режима короткого замыкания [Текст] / Д. С. Ярымбаш, М. И. Коцур, С. Т. Ярымбаш, И. М. Коцур // Электротехника и электроэнергетика – 2017. – № 1. – С. 24-30. DOI: 10.15588/1607-6761-2017-1-4.

Стаття надійшла до редакції 20.07.2018

УТОЧНЯЮЩИЙ ПОДХОД К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ ПРОНИЦАЕМОСТЕЙ АНИЗОТРОПНЫХ ХОЛОДНОКАТАНЫХ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СТАЛЕЙ

ДИВЧУК Т.Е.

старший преподаватель кафедры электрических машин Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина, e-mail: DIV2009@i.ua;

ЯРЫМБАШ Д.С

д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой электрических машин Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина, e-mail: yarymbash@gmail.com;

ЯРЫМБАШ С.Т

канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры электрических машин Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина, e-mail: kstj06@gmail.com;

КИЛИМНИК И.М.

канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры высшей математики Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина, e-mail: dnukim76@gmail.com;

КОЦУР М.И.

канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры электрических и электронных аппаратов Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина, e-mail: kotsur8@gmail.com;

БЕЗВЕРХНЯЯ Ю.С.

аспирант кафедры электрических и электронных аппаратов Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина e-mail: juliaeee@ukr.net.

Цель работы. Разработать эффективный подход для определения математических функциональных соотношений для высокоточного описания нелинейных зависимостей относительной магнитной проницаемости от индукции магнитного поля с учетом анизотропии современных марок холоднокатаных электротехнических сталей, которые применяются в производстве новых серий силовых трансформаторов.

Методы исследования. Исследования проводились с применением методов интерполяции, аппроксимации, регрессионного анализа, математической физики, теории электромагнитного поля.

Полученные результаты. Проведены исследования методов функционального представления нелинейных характеристик намагничивания ферромагнитных материалов, в том числе, холоднокатаных анизотропных электротехнических сталей. Предложен уточняющий подход к увеличению размерности исходных данных на

основе метода сплайн-интерполяции на базисе полиномов Эрмита для цифровых данных характеристик намагничивания, что исключает увеличение погрешностей определения относительных магнитных проницаемостей на участках между узловыми значениями магнитной индукции. Для математического описания зависимостей относительной магнитной проницаемости от индукции магнитного поля разработан специальный функциональный базис с функциями Гаусса и дополнительными функциями погрешностей, обеспечивающий непрерывность производных различных порядков при фиксированных значениях углов между направлением прокатки анизотропной электротехнической стали и магнитного потока. Применен метод нелинейной регрессии в структуре встроенных функций прикладного пакета MathCAD для высокоточного определения векторов коэффициентов регрессии в функциональных описаниях относительных магнитных проницаемостей. Путем верификации и валидации результатов уточняющей нелинейной регрессии с данными расчетов по обобщенной методике и с экспериментальными данными получено существенное уменьшение относительных погрешностей, которая не превышает 1,62% при фиксированных значениях углов между направлением прокатки анизотропной электротехнической стали и магнитного потока. Применение новых уравнений регрессии существенно улучшает условия для полевого моделирования электромагнитных полей в режиме холостого хода силового трансформатора в структуре средств Comsol Multiphysics, и обеспечивает устойчивость итерационных вычислительных процессов.

Научная новизна. Реализован новый подход к увеличению размерности входных массивов на основе сплайн-интерполяции массивов цифровых данных характеристик намагничивания для фиксированных значений углов между направлениями прокатки электротехнической стали и магнитного потока. Для уравнений нелинейной регрессии разработан новый функциональный базис с функциями Гаусса и дополнительными функциями погрешностей для математических описаний с непрерывными производными для зависимостей относительных магнитных проницаемостей анизотропных холоднокатаных электротехнических сталей от индукции магнитного поля с высокой точностью в интервале изменения углов между направлениями прокатки и магнитного потока от 0° до 90° .

Практическая ценность. Предложенные в работе подходы и методики для базиса функций Гаусса и дополнительных функций погрешностей позволяют существенно повысить точность определения нелинейных характеристик анизотропных электротехнических сталей и уменьшить относительные погрешности до 1,62% при изменении углов между направлениями прокатки и магнитного потока от 0° до 90° .

Ключевые слова: характеристики намагничивания; анизотропия; относительная магнитная проницаемость, сплайн-интерполяция, функциональный базис, метод нелинейной регрессии, электромагнитное поле.

AN ADJUSTING APPROACH TO THE DETERMINATION OF THE PERMEABILITY FUNCTIONAL DEPENDENCIES OF ANISOTROPIC COLD-ROLLED ELECTROTECHNICAL STEELS

DIVCHUK T.E.

Senior Lecturer, Department of Electrical Machines, Zaporizhzhia National Technical University, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: DIV2009@i.ua;

YARYMBASH D.S.

Dr. Tech. Sci., Associate Professor, Head of the Department of Electrical Machines, Zaporizhzhia National University, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: yarymbash@gmail.com;

YARYMBASH S.T.

PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electrical Machines, Zaporizhzhia National Technical University, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: kstj06@gmail.com;

KYLYMNYK I.M.

PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department of High Mathematics, Zaporizhzhia National Technical University, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: dnukim76@gmail.com;

KOTSUR M.I.

PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electrical and Electronic Apparatuses, Zaporizhzhia National Technical University, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: kotsur8@gmail.com;

BEZVERKHNIYA Yu.S.

Postgraduate student, Department of Electrical and Electronic Apparatus, Zaporizhzhia National Technical University, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: juliaeeaa@ukr.net.

Purpose. To develop an effective approach for the determination of mathematical functional relationships for the high-precision description of the nonlinear dependences of the permeability on the magnetic flux density, taking into

account the anisotropy of modern cold-rolled electrotechnical steel, which are used in the production of new series of power transformers.

Methodology. The researches were carried out using interpolation methods, approximation, regression analysis, mathematical physics, electromagnetic field theory.

Findings. The methods of functional conception of nonlinear characteristics of magnetization of ferromagnetic materials, including cold-rolled anisotropic electrotechnical steels, are researched. An adjustment approach is proposed to increase the dimension of the initial data, based on the spline interpolation method on the Hermite polynomial basis for the digital data of the magnetization characteristics. This excludes an increase of the errors in determining the permeabilities in the sections between the nodal values of the magnetic flux density. For a mathematical description of the dependences of the permeability on the magnetic flux density, a special functional basis with Gaussian functions and additional error functions has been developed, that ensures the continuity of derivatives of various orders at fixed angular values between the rolling direction of anisotropic electrical steel and magnetic flux. The method of nonlinear regression in the structure of function package of the Mathcad software for the high-precision determination of regression coefficient vectors in functional descriptions of permeabilities is applied. With the help of verification and validation of the results, which adjusting nonlinear regression with computational data using the generic method and with experimental data, a significant decrease in the relative errors that do not exceed 1.62% for fixed angles between the direction of rolling of anisotropic electrical steel and magnetic flux is obtained. The application of the new regression equations substantially improves the conditions for the field simulation of electromagnetic fields in the open-circuited mode of the power transformer in the Comsol Multiphysics software, and ensures the stability of iterative computing processes.

Originality. A new approach to increasing the dimension of input arrays, based on spline interpolation of digital data arrays of magnetization characteristics for fixed angles between the directions of rolling of the electrical steel and magnetic flux is implemented. For nonlinear regression equations, a new functional basis with Gaussian functions and additional error functions for mathematical descriptions with continuous derivatives for the dependences of the permeabilities of anisotropic cold-rolled electrotechnical steels on the magnetic flux density with high accuracy in the range of angles variation between the rolling directions and magnetic flux from 0° to 90° .

Practical value. The approaches and techniques for the basis of Gaussian functions and additional error functions proposed in this paper make it possible to significantly improve the accuracy of determining the nonlinear characteristics of anisotropic electrotechnical steels. Also to reduce the relative errors to 1.62% when the angles between directions of rolling of the electrotechnical steels and magnetic flux vary from 0° to 90° .

Keywords: magnetization characteristics; anisotropy; permeability; spline interpolation; functional basis; nonlinear regression method; electromagnetic field

REFERENCES

- [1] Tikhomirov, P. M. (1986). Raschet transformatorov [Calculation of transformers]. M.: Energoatomizdat, 528. (in Russian).
- [2] Kulkarni, S.V., Kharade, S.A. (2004). Transformer Engineering, Design and Practice, New York: Marcel Dekker, 478. (in English).
- [3] Tang Qi, Guo S., Wang Z. (2015). Magnetic flux distribution in power transformer core with mitred joints. Journal of Applied Physics, 117, 17, 17D522-1–17D522-4. DOI: 10.1063/1.4919119.
- [4] Rashtchi, V., Rahimpour, E., Rezapour, E. M. (2011). Parameter identification of transformer detailed model based on chaos optimisation algorithm. IET Electric Power Applications, 5, 2, 238-246. DOI: 10.1049/iet-epa.2010.0147.
- [5] Paikov, I.A., Tikhonov, A.I. (2015). Analiz modeley dla elektromagnitnogo rascheta silovykh transformatorov [Analysis of models for the electromagnetic calculation of power transformers]. Vestnik IGEU, 3, 38-43. (in Russian).
- [6] Jazebi, S., de León, F., Farazmand, A., Deswal, D. (2013). Dual Reversible Transformer Model for the Calculation of Low-Frequency Transients. IEEE Transactions on Power Delivery, 28, 4, 2509–2517. DOI: 10.1109/TPWRD.2013.2268857.
- [7] Bul', O.B. (2006). Metody rascheta magnitnykh system elektricheskikh apparatov. Programma ANSYS. Uchebnoe posobie dla studentov vuzov [Methods for calculating the magnetic systems of electrical apparatus. ANSYS program Training manual for university students]. M.: Akademiya, 288. (in Russian).
- [8] Butarev I. Ju., Potapov, L.A. (2011). Comsol multiphysics: Modelirovanie electromekhanicheskikh ustroystv [Comsol multiphysics: Modeling of electromechanical devices]. Bryansk: Izdatel'stvo Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 113. ISBN 978-5-89838-520-0. (in Russian).
- [9] Bul', O.B. (2005). Metody rascheta magnitnykh system elektricheskikh apparatov. Magnitnye cepi, polya i programma FEMM. [Methods for calculating the magnetic systems of electrical apparatus. Magnetic circuits, fields and the FEMM program]. Uchebnoe posobie dla vuzov po special'nosti «Elektricheskie i elektronnye apparaty» napravleniya «Elektrotehnika, electromekhanika i elektrotehnologiya», Moscow, Akademiya, 336 (in Russian).
- [10] Molotilov, B.V., Mironov, L.V., Petrenko, A.G., and et al. (1989). Kholodnokatanyye elektrotekhnich-

- eskiye stali [Cold-rolled electrical steel: Reference], Moscow, Metallurgiya, 167 (in Russian).
- [11] Demidenko, E.Z. (1981). Lineynaya i nelineynaya regresiya [Linear and nonlinear regression]. M.: Finansy i statistika, 304. (in Russian).
- [12] Korol' E.G. (2007). Analiz metodov modelirovaniya magnitnykh harakteristik elektromagnitov dla kompensacii magnitnogo polya electrooborudovaniy [Analysis of methods for modeling the magnetic characteristics of electromagnets for compensation of the magnetic field of electrical equipment]. Elektrotehnika i Electromekhanika, 2, 31-34. (in Russian)
- [13] Bessonov L.A. (1948). Elektricheskie cepi so stal'ju [Electric circuits with steel]. M.: Gosenergoizdat, 344. (in Russian).
- [14] Demirchan K.S. (1974). Modelirovanie magnitnykh poley [Modeling of magnetic fields]. Leningrad: Energiya, 288. (in Russian).
- [15] Pentegov, I.V., Krasnozhan, A.V. (2006). Universal'naya approksimaciya krivykh namagnichevaniya elektrotehnicheskikh staley [Universal approximation of magnetization curves for electrical steel]. Elektrotehnika i Electromekhanika, 1, 66-70. (in Russian).
- [16] Yarymbash, D., Yarymbash, S., Divchuk, T., Kylymnik, I. (2016). Osoblyvosti vyznachennya parametriv korotkoho zamykannya sylovykh transformatoriv zasobamy pol'ovoho modelyuvannya [Determination features of the power transformer short circuit parameters through field modeling]. Electrical Engineering And Power Engineering, 1, 12-17. doi: <http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2016-1-2> (in Ukrainian).
- [17] Yarymbash, D., Yarymbash, S., Divchuk, T., Kylymnik, I. (2016). Osoblyvosti rozpodilennya mahnitnykh potokiv u rezhymy nerobochoho khodu sylovykh transformatoriv [The features of magnetic flux distribution of the idling mode of the power transformers]. Electrical Engineering And Power Engineering, 2, 5-12. doi: <http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2016-2-1> (in Ukrainian).
- [18] Divchuk, T., Yarymbash, D., Yarymbash, S., Kylymnyk, I., Kotsur, M., Bezverkhnia, Y. (2018). Podkhod k opredeleniyu tokov kholostogo khoda silovykh trekhfaznykh transformatorov s ploskimi sterzh-nevymi magnitnymi sistemami [Approach to determination of no load current of three-phase power transformers with plane rods magnetic systems]. Electrical Engineering And Power Engineering, 2, 56-66. doi: <http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2017-2-6> (in Russian).
- [19] Graph2Digit: www.plsoft.ru
- [20] Pan'kiv, V.I., Tankevich, E.M., Lutchin, M.M. (2014). Aproksymaciya kharakterystyk namagnichuvannya transformatoriv strumu [Approximation of magnetization characteristics of current transformers]. Praci Instytutu elektrodynamiky, 37, 82-90. (in Ukrainian).
- [21] Malyar, V., Malyar, A., Grechin, D. (2004). Aproksymaciya kharakterystyk namagnichuvannya elektrotekhnichnykh staley [Approximation of magnetization characteristics of electrotechnical steels]. Teoretychna elektrotehnika, 57, 78-85. (in Ukrainian).
- [22] Malyar, V.S., Dobushovska, I.A. (2010). Aproksymaciya kharakterystyk namagnichuvannya elektrotekhnichnykh staley splaynami drugogo poriadku [Approximation of magnetization characteristics of electrotechnical steels by splines of second order]. Elektroenergetychni ta electromekhanichni systemy, 671, 67-72. (in Ukrainian).
- [23] Zhermen-Lakur, P., Shenon, P., Kosnar, M., Gardan, I., Rober, F., Rober, I., Vitomski, P., Kastel'zho, P. (1988). Matematika i SAPR: v 2-h kn. Kn. 1. Perevod s franc. M.: Mir, 204. ISBN 5-03-000417-3, OCR. (in Russian).
- [24] Korn, G., Korn, T. (1977). Spravochnik po matematike (dla nauchnykh rabotnikov i inzhenerov) [Manual on mathematics (for scientists and engineers)]. M.: Nauka, 830. (in Russian).
- [25] (2013). Algorytmizaciya ta programuvannya. MathCAD. [Algorithmization and programming]. Pidruchnyk. L'viv: Vydavnytstvo L'vivs'koi politehniky, 364. (in Ukrainian).
- [26] Yarymbash, D., Kotsur, M., Yarymbash, S., & Kotsur, I. (2017). Osobennosti opredeleniya parametrov skhemy zameshcheniya asinkhronnogo dvigatelya dlya rezhima korotkoho zamykaniya [Features of parameter determination of the induction motor substitution circuit for short-circuit mode]. Electrical Engineering And Power Engineering, 1, 24-30. doi: <http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2017-1-4> (in Russian).

ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ ТЕПЛООБМЕНА В КОНЦЕВЫХ УПЛОТНЕНИЯХ ЦВД И ЦНД ТУРБИНЫ К-1000-60/3000

- ЧЕРНОУСЕНКО О.Ю.** д-р техн. наук, профессор, заведующая кафедрой теплоэнергетических установок тепловых и атомных электростанций, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского», г. Киев, Украина; e-mail: chernousenko20a@gmail.com
- БУТОВСКИЙ Л.С.** канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры теплоэнергетических установок тепловых и атомных электростанций, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского»; г. Киев, Украина; e-mail: home_129@mail.ru
- НИКУЛЕНКОВА Т.В.** канд. техн. наук, доцент кафедры теплоэнергетических установок тепловых и атомных электростанций, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского»; г. Киев, Украина; e-mail: tetyana.nikulenkova@gmail.com
- БЕДНАРСКАЯ И.С.** магистрант кафедры теплоэнергетических установок тепловых и атомных электростанций, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского»; г. Киев, Украина; e-mail: innabednarska1@gmail.com

Цель работы. Исследование режимов работы влажно-паровой турбины мощностью 1000 МВт, разработка методики расчета и определении граничных условий теплообмена для концевых уплотнений роторов высокого и низкого давлений на переменных режимах работы энергоблоков для последующего выполнения оценки малоциклового усталости роторов турбины К-1000-60/3000, определение степени возможной поврежденности основного металла, расчета остаточной наработки, а также индивидуального ресурса.

Методы исследования. При моделировании геометрии уплотнений на первом этапе поверочного расчета разработана методика создания пространственных конструкций элементов турбомашин с применением для РВД и РНД программного продукта Solid Works и математического метода расчета, который заложен в нем (метод конечных элементов).

Полученные результаты. Выполнены расчеты граничных условий участков концевых уплотнений РВД и РНД при пусках из холодного, неостывшего и горячего состояний с учетом изменения режимных параметров. Установлено, что значение коэффициента теплообмена увеличивается с ростом мощности турбины и имеет максимальную величину при номинальном режиме. Максимальная величина коэффициента теплоотдачи для РВД $\alpha = 2168,8 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, для РНД $\alpha = 701,5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Получена аппроксимирующая зависимость коэффициента теплоотдачи для начального участка ротора высокого давления от относительного расхода пара на турбину в диапазоне 0,4 – 1,0.

Научная новизна. Авторами впервые проведены расчеты значений коэффициента теплоотдачи для концевых уплотнений роторов высокого и низкого давлений для трех видов пуска – из холодного, неостывшего и горячего состояния в зависимости от теплового состояния роторов и относительного расхода пара на турбину. Полученная аппроксимирующая зависимость коэффициента теплоотдачи для начального участка ротора высокого давления от относительного расхода пара на турбину в диапазоне 0,4 – 1,0 дает возможность выполнять необходимые расчеты при других видах пусков и температурном состоянии роторов.

Практическая ценность. Полученные результаты расчетов коэффициента теплоотдачи на участках концевых уплотнений РВД и РНД при пусках из различных тепловых состояний дают возможность рассчитывать термонапряженное состояние роторов турбины и оценить величину малоциклового усталости роторов ЦВД и ЦНД.

Ключевые слова: турбина паровая; переднее концевое уплотнение; заднее концевое уплотнение; пуск из холодного, горячего, неостывшего состояния; теплообмен в уплотнениях; граничные условия.

1. ВВЕДЕНИЕ

Атомная энергетика является основной альтернативой ископаемым видам топлива - углю, нефти и газу в области получения электроэнергии, а также

сокращения при этом выброса в атмосферу углекислого газа и сокращения, таким образом, парникового эффекта [1].

По состоянию на 2011 г. по данным МАГАТЭ в мире эксплуатировалось 435 ядерных энергоблока

общей установленной электрической мощностью примерно 370 ГВт и 63 ядерных энергоблока (60,5 ГВт) находились в стадии строительства [2]. По прогнозам МАГАТЭ [3] установленные мощности мирового парка АЭС к 2030 г. достигнут 500 ГВт при минимальном сценарии развития и 746 ГВт при максимальном. В соответствии с последним прогнозом Международного энергетического агентства (IEA) [4] доля ядерной энергии в удовлетворении спроса на первичную энергию вырастет не значительно – с 6% в 2009 г. до 7% в 2035 г. Прогнозируется рост спроса на все виды электроэнергоносителей на фоне уменьшения доли ископаемых видов топлива в мировом потреблении первичных энергоресурсов с 81% в 2010 г. до 75% в 2035 г. [4]. С целью повышения эффективности цикла АЭС рассматривается вопрос о переходе водоохлаждаемых реакторов на сверхкритические параметры. С этой целью в Европе организован Консорциум по разработке легководных реакторов с высокими характеристиками (HPLWR), которые проектируются на СКД [5]. Ожидаемый КПД АЭС – примерно 44%.

В настоящее время многие промышленно развитые страны Азии, Европы и Америки инвестируют значительные средства в развитие атомной энергетики, что позволяет вводить в строй ежегодно десятки атомных реакторов.

Украина занимает седьмое место в мире по показателю установленной мощности АЭС – 14148 МВт. На четырех атомных электростанциях – Запорожской, Ровенской, Южно-Украинской и Хмельницкой эксплуатируются 15 энергоблоков, из которых тринадцать – типа ВВЭР-1000 и два – ВВЭР-440 [6].

По данным различных источников в последнее время доля выработки электроэнергии на атомных электростанциях Украины составляет более 50 % от общей совместной выработки с тепловыми электростанциями. Значительная часть энергетических блоков ТЭС была введена в строй в 70-е годы XX столетия и большинство из них выработали свой ресурс, они физически и морально устарели и будут неизбежно выводиться из эксплуатации несмотря на принимаемые меры по продлению ресурса их работы. В итоге доля атомных электростанций в выработке электроэнергии будет постепенно расти.

В то же время некоторые блоки АЭС также близки или уже несколько превысили свой проектный срок эксплуатации – 30 лет [10]. В это число попадают блоки ЗАЭС3, РАЭС3, ЗАЭС4, ХАЭС1, что неизбежно требует проведения комплекса мероприятий по анализу состояния их основного оборудования – реакторов, турбин, решения вопроса о возможной их дальнейшей эксплуатации, а также разработки мероприятий по продлению срока их эксплуатации [11].

II. АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Для стабильной работы электрических станций в

структуре генерирующих мощностей базовые энергоблоки (в первую очередь блоки 1000 МВт на АЭС) должны составлять (50-55)% от общей мощности, полупиковые энергоблоки – (30-35)%, а пиковые энергоблоки – 15%. В то же время в Украине мощности пиковых гидроэлектростанций (ГЭС) и гидроаккумулирующих станций (ГАЭС), которые могут быть высокоманевренными пиковыми мощностями, составляют только 10,1%. Суммарная выработка энергоблоков ТЭС мощностью 100-150 МВт, которые могут эффективно использоваться как маневренные полупиковые составляет примерно 18%. Поэтому распространенной практикой является использование в маневренных полупиковых режимах, кроме пылеугольных блоков мощностью 200-300 МВт, а также блоки АЭС мощностью 1000 МВт, которые не проектировались для работы в таких режимах.

Работа на переходных маневренных режимах (пуск – остановка) приводит к возникновению дополнительных термических напряжений в оборудовании станции, что существенно влияет на надежность роторов и корпусов турбины, которые наряду с реактором являются одними из аварийно опасных элементов станции. В соответствии с этим, количество пусков за срок службы оборудования ограничено нормативными документами.

Для обеспечения возможности вращения ротора в неподвижном корпусе между ними предусмотрен соответствующий зазор, через который протекает определенное количество рабочего тела – пара. Для уменьшения потерь пара через зазоры между ротором и корпусом применяют лабиринтные уплотнения, представляющие собой ряд сужений для потока протечки [12], [13]. Пар, проходящий через уплотнения, не совершает полезной работы в ступени турбины, поэтому энергия пара через протечки является потерянной для турбины.

Расходы пара в уплотнениях могут составлять (2 – 4)% от общего расхода пара на турбину, что приводит к уменьшению электрической мощности турбоустановки. Длина концевых уплотнений может достигать до (30 – 40)% от длины проточной части турбины [12], [13].

Общие принципы конструктивного выполнения уплотнений паровых турбин, в том числе и концевых уплотнений, определяются нормативными документами [14]. При конструктивных отклонениях во время изготовления или сборки элементов уплотнения могут возникнуть задевания вращающихся деталей о неподвижные. Такие задевания могут иметь место также при короблении статорных или изгибе роторных элементов, вследствие повышенной вибрации ротора [10], а также при неправильной организации рабочего процесса на переменных режимах, особенно при пуске турбины. При задевании деталей в месте касания металла ротора и статора выделяется теплота, при которой нагреваются периферийные слои металла ротора и статора. В результате теплового расширения

металла в месте касания возникает деформация ротора и напряжения сжатия, которые могут превзойти предел текучести материала и в роторе могут возникнуть остаточные деформации, что делает невозможной дальнейшую эксплуатацию турбины.

Условия работы цилиндра и ротора главным образом характеризуются уровнем и распределением температур в этих деталях, так как именно этими факторами определяются основные характеристики прочности металла.

В случае использования уплотнений с гладким ротором при задевании гребней уплотнения о поверхность ротора они стачиваются, зазоры увеличиваются, утечки пара возрастают и экономичность установки снижается. Выполняемые работы по совершенствованию уплотнений связаны с анализом процессов, происходящих в уплотнениях при различных режимах работы и различном исполнении уплотнений традиционного вида [15, 16].

Работы по усовершенствованию конструкции уплотнений паровых турбин ведутся в направлении разработки и применения новых типов уплотнений, в частности, сотового типа [10]. Опытные и внедренческие работы выполнены для ряда конденсационных и теплофикационных турбин различной мощности от 150 МВт до 1200 МВт на тепловых электростанциях [17, 18]. Результаты применения уплотнений сотового типа для турбины АЭС типа К-1000-60/1500-2 рассмотрен в работе [19], где приведено сравнение характеристик уплотнений лабиринтного и сотового типа.

Для уменьшения термонапряженного состояния корпуса и ротора турбины в области концевых уплотнений и увеличения ресурса ведутся работы по совершенствованию схемы подачи пара на уплотнения для турбоустановок различной мощности и назначения [20, 21].

В настоящее время работы в указанных направлениях для турбины типа К-100-60/3000 не ведется. Для определения возможного направления работ по повышению эффективности концевых уплотнений и экономичности турбоустановки, увеличению надежности и срока службы агрегата и разработки соответствующих мероприятий по модернизации системы необходимо проведение работ по анализу существующих условий работы оборудования.

Кроме того, вопросы экономики ставят все более жесткие требования к сокращению времени пуска и остановки турбоагрегатов и возможности быстрого изменения режима их работы. Это вызывает необходимость подробного исследования работы основных элементов турбин в условиях нестационарных температурных режимов.

Таким образом, выбор режимов эксплуатации турбины в значительной степени определяется процессами тепломассообмена в уплотнениях турбины.

По расчету процессов теплообмена в уплотнениях различного типа и условий применения имеется достаточно обширная литература [22] – [25], но приведенные данные относятся, в основном, к исследованиям на моделях, и не учитывают специфику работы конкретных концевых уплотнений, например, на турбине К-1000-60/3000 и влияние на процессы теплообмена при работе турбины на переменных режимах.

III. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Цель работы заключается в исследовании режимов работы влажно-паровой турбины мощностью 1000 МВт, разработки методики расчета и определения граничных условий теплообмена для концевых уплотнений роторов высокого и низкого давлений на переменных режимах работы энергоблоков для последующего выполнения оценки малоциклового усталости роторов турбины К-1000-60/3000 Хмельницкой АЭС, определение степени возможной поврежденности основного металла, расчета остаточной наработки, а также индивидуального ресурса.

IV. ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА И АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Турбина К-1000-60/3000 - паровая, конденсационная, с нерегулируемыми отборами пара, промежуточной сепарацией и одноступенчатым паровым промежуточным перегревом, рассчитана для работы в блоке с реактором ВВЭР-1000М [27].

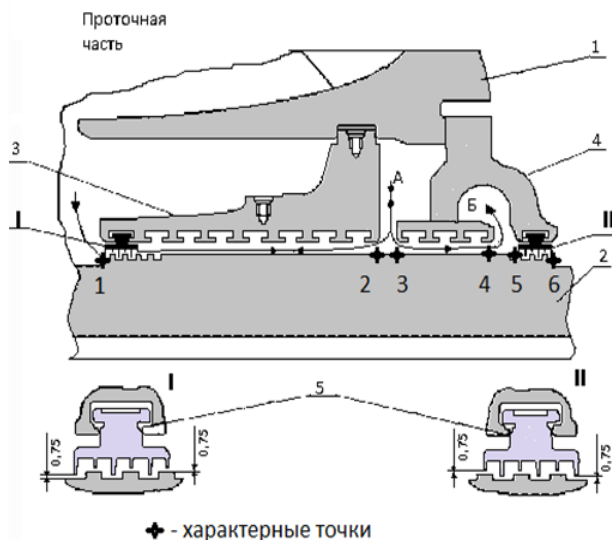
В состав турбины К-1000-60/3000 входят один цилиндр высокого давления четыре цилиндра низкого давления, предназначенных для преобразования тепловой энергии пара в механическую энергию вращения ротора турбины.

Цилиндр высокого давления - двухпоточный, по пять ступеней давления в каждом потоке, состоит из наружного и внутреннего корпусов. Проточная часть ЦВД состоит из диафрагм и рабочих колес.

Ротор ЦВД - цельнокованный, с постоянным корневым диаметром всех ступеней. В местах выхода ротора из корпуса установлены концевые уплотнения, предназначенные для предотвращения подсоса воздуха в турбину при наборе вакуума и при работе турбины с малыми расходами пара, а также для предотвращения утечки пара в помещение машзала при нагрузках турбины, когда давление пара на выходе из ЦВД выше давления уплотняющего пара в коллекторе.

Концевое уплотнение (рис. 1) представляет собой сегменты уплотнений (5), расположенные в обойме (3) и в каминной камере (4). Сегменты имеют уплотнительные усики различной длины, которые совместно с соответствующими выступами и впадинами на роторе (2) образуют лабиринт. Радиальные зазоры в концевых уплотнениях составляют 0,75 мм.

Цилиндры низкого давления (ЦНД-1,2,3,4) - двухпоточные, по пять ступеней давления в каждом потоке. ЦНД состоит из наружного и внутреннего



1 – корпус наружный ЦВД; 2 – ротор; 3 – обойма уплотнения; 4 – камера каминная; 5 – сегмент уплотнения. А – подвод уплотняющего пара (отвод протечек пара); Б – отсос паровоздушной смеси. 1-6 – точки для расчета коэффициентов теплопередачи.

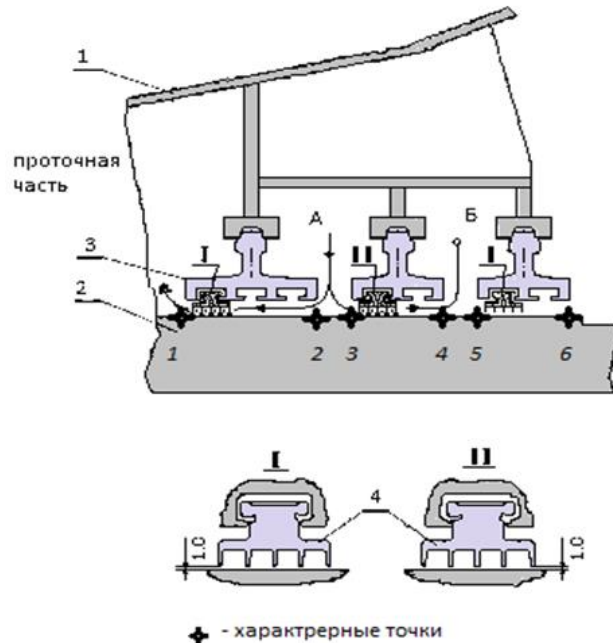
Рисунок 1. Узел концевых уплотнений ЦВД и схема расположения точек для расчета коэффициентов теплоотдачи по поверхности ротора высокого давления паровой турбины К-1000-60/3000

корпусов сварной конструкции. Наружный корпус ЦНД состоит из трех частей - средней и двух выхлопных. Наружный корпус цилиндра (1), обойма (3) и корпус каминной камеры (4), а также собственно каминная камера образуют камеры уплотнений. Из камеры "А" уплотнений со стороны проточной части производится отвод протечек пара или подвод уплотняющего пара на режимах, когда давление пара на выходе из ЦВД ниже атмосферного, а из каминной камеры "Б" (со стороны атмосферы) производится отсос паровоздушной смеси.

Роторы ЦНД - сварно-кованные, с постоянным корневым диаметром всех ступеней. В местах выхода роторов из наружных корпусов ЦНД расположены концевые уплотнения, предназначенные для предотвращения подсоса воздуха в вакуумную систему турбины на всех режимах работы. Концевое уплотнение (рис. 2) представляет собой сегменты уплотнений (4), расположенные в обоймах (3). Сегменты имеют уплотнительные усики, образующие лабиринт. Радиальные зазоры в концевых уплотнениях ЦНД составляют 1,0 мм.

Наружный корпус ЦНД (1) и обоймы (3) образуют камеры уплотнений. В камеру "А" уплотнений со стороны проточной части подводится уплотняющий пар, а из камеры "Б" со стороны атмосферы производится отсос паровоздушной смеси.

Турбина снабжена системой пароснабжения концевых уплотнений цилиндров и отсоса из них паровоздушной смеси. Камеры "А" концевых



1 - наружный корпус ЦНД, 2 - ротор ЦНД, 3 - обоймы уплотнений, 4 - сегменты уплотнений. А – подвод уплотняющего пара (отвод протечек пара); Б – отсос паровоздушной смеси; 1-6 – точки для расчета коэффициентов теплопередачи.

Рисунок 2. Узел концевых уплотнений ЦНД и схема расположения точек для расчета коэффициентов теплоотдачи по поверхности ротора низкого давления паровой турбины К-1000-60/3000

уплотнений (рис. 1, 2) со стороны проточной части соединены с коллектором уплотняющего пара, пароснабжение которого производится от паровой уравнивающей линии деаэраторов или от РУ 14/7 через регулирующий клапан, поддерживающий давление в коллекторе в пределах 0,15-0,2 кгс/см². При неисправности регулирующего клапана предусмотрена возможность пароснабжения коллектора уплотняющего пара по байпасу, на котором установлена задвижка.

В коллектор уплотняющего пара производится также отвод пара из вторых камер уплотнений штоков стопорных и регулирующих клапанов высокого давления и первых камер уплотнений штоков стопорных и регулирующих клапанов низкого давления, а при нагрузках турбины более 20 % номинальной – также и пар из камер "А" концевых уплотнений ЦВД со стороны проточной части. Подвод пара к камерам уплотнений ЦНД выполнен двухсторонним (трубопроводом D_y 150 в нижнюю часть окружности камеры уплотнения и трубопроводом D_y 50 - в верхнюю часть окружности уплотнения). Отсос паровоздушной смеси из камер "Б" концевых уплотнений со стороны воздуха производится в сальниковый подогреватель, в котором водоструйными эжекторами поддерживается давление $\sim 0,92$ кгс/см² (абс.).

Расчетные исследования высокотемпературных

элементов турбоустановки К-1000-60/3000 блок №1, согласно [24], проведены для наиболее характерных в практике эксплуатации ХАЭС режимов работы.

Пуск турбины производился согласно соответствующему графику-заданию, а именно:

- пуск из холодного состояния (ХС) при температуре металла наружной поверхности фланца ЦВД в зоне паровпуска $T_{\text{фл.ЦВД}} < 60^\circ\text{C}$ согласно графику-заданию пуска турбины из холодного состояния;

- пуск из неостывшего состояния (НС) при температуре металла наружной поверхности фланца ЦВД в зоне паровпуска $100^\circ\text{C} < T_{\text{фл.ЦВД}} < 150^\circ\text{C}$ согласно графику-заданию пуска турбины из неостывшего состояния;

- пуск из горячего состояния (ГС) - при температуре металла наружной поверхности фланца ЦВД в зоне паровпуска $150^\circ\text{C} < T_{\text{фл.ЦВД}} < 200^\circ\text{C}$ согласно графику-заданию пуска турбины из горячего состояния.

При температуре металла наружной поверхности фланца ЦВД в зоне паровпуска, отличающейся от температуры, приведенной на графиках, пуск турбины производился по ближайшему графику, соответ-

ствующему более холодному состоянию.

На рис.3 показан обобщенный сравнительный график зависимости мощности турбоустановки от времени пуска для трех состояний – ХС, НС и ГС. По приведенным данным можно определить электрическую мощность турбины в любой момент времени в том числе и на режимах пусков из других промежуточных тепловых состояний. Пуск из холодного состояния длится 379 мин., из неостывшего – 320 мин., из горячего – 260 мин. Геометрическая модель концевых уплотнений ротора ВД турбины К-1000-60/3000 приведена на рис. 1, а ротора НД – на рис. 2.

Для характерных режимов по мощности, где имелись перегибы в кривых изменения параметров, выбирались абсолютные текущие расходы пара в первой ступени – $G_{\text{п1ст}}$, по которым, в свою очередь, рассчитывались относительные расходы пара $G_{\text{п1ст}}^{\text{ст}}/G_{\text{п01}}^{\text{ст}}$, где $G_{\text{п01}}^{\text{ст}}$ – расход пара через 1 ступень на номинальном режиме. Для каждого режима по зависимости Флюгеля-Стодолы [13] строились процессы расширения пара по ступеням в h - s диаграмме и рассчитывались характеристики, необходимые для определения параметрических данных.

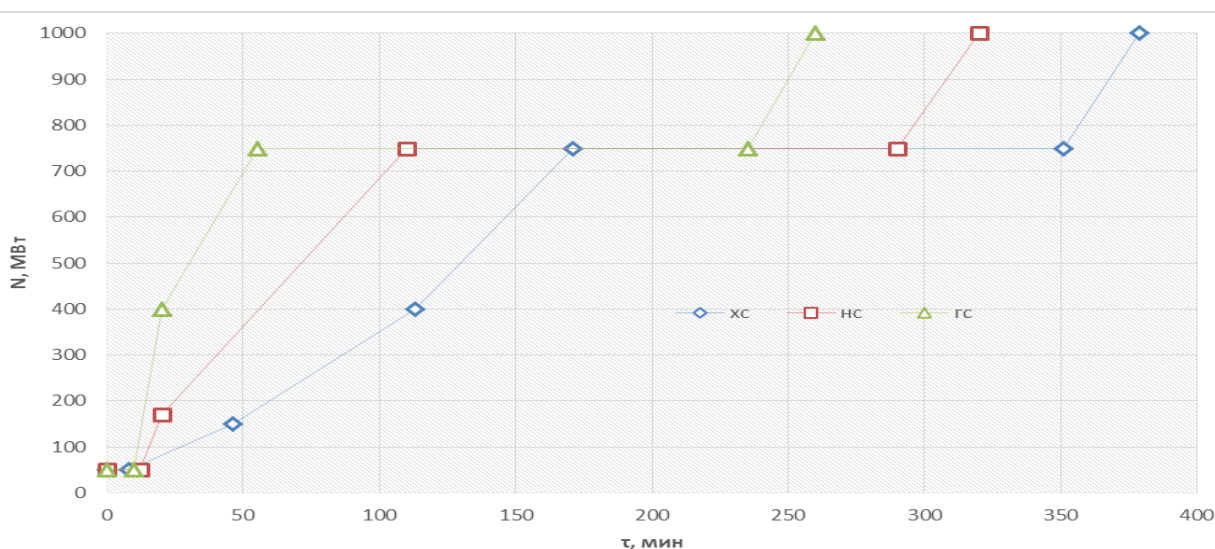


Рисунок 3. Обобщенный график зависимости мощности турбины от времени пуска для различных тепловых состояний.

При моделировании геометрии уплотнений на первом этапе поверочного расчета разработана методика создания пространственных конструкций элементов турбомашин с применением для РВД и РНД программного продукта Solid Works [26].

Изменений в проектную конструкцию РВД и РНД завода изготовителя в процессе поверочного расчета не вносилось.

При задании ГУ учитывались схемы протечек пара в уплотнениях в соответствии с реальными графиками пуска из различных тепловых состояний. Ко-

эффициенты теплоотдачи для уплотнений определялись согласно критериальным уравнениям [27].

На поверхностях роторов при решении краевой задачи нестационарной теплопроводности задавали нестационарные ГУ I–IV рода с учетом эксплуатационных переменных режимов работы.

ГУ I рода задаются, когда известна температура поверхности тела в текущий момент времени, и имеют вид:

$$T_{cm} = (x, y, z, \tau).$$

ГУ II рода задаются по тепловому потоку на поверхности тела $q_{\text{ст}}$ для изолированных поверхностей:

$$q = -\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right) = f_2(x, y, z, \tau).$$

ГУ III рода задаются по температуре пара и закономерности теплообмена между средой и поверхностью тела в виде:

$$-\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right) = \alpha(t_{\text{cp}} - t_{\text{ст}}).$$

ГУ IV рода соответствуют идеальному контакту твердых тел, когда оба тела на границе их соприкосновения имеют одинаковые температуры и тепловые потоки:

$$T_{\text{cm1}} = T_{\text{cm2}},$$

$$-\lambda_1 \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_1 = -\lambda_2 \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_2.$$

При определении граничных условий теплообмена роторов необходимо иметь информацию относительно его характерных размеров и выполнить детальный расчет проточной части на номинальном режиме эксплуатации. В ходе детального расчета отсека определяют основные термодинамические параметры пара (давление, температура, удельный объем), перепады энтальпий, величины потерь и значения скоростей на среднем сечении для сопловых и рабочих лопаток ступени. При нестационарных режимах работы используется расчетная оценка приведенных выше параметров пара для расходов, соответствующих графику - заданию (например, рис. 2).

После определения основных параметров на номинальном и переменных режимах эксплуатации можно непосредственно перейти к определению граничных условий I-IV рода.

В соответствии с этими преобразованиями критериальные уравнения для уплотнений ротора высокого давления имеют вид:

$$Nu = 1,14 \cdot Re^{0,6} \left(\frac{h}{\delta} \right)^{-0,56} Pr^{0,43},$$

$$Re = 2 \cdot 10^2 \div 6 \cdot 10^3,$$

$$Nu = 2,04 \cdot Re^{0,5} \left(\frac{h}{\delta} \right)^{-0,56} Pr^{0,43},$$

$$Re \leq 1 \cdot 10^4,$$

$$Nu = 0,476 \cdot Re^{0,7} \left(\frac{h}{\delta} \right)^{-0,56} Pr^{0,43},$$

$$Re = 6 \cdot 10^3 \div 1,2 \cdot 10^5.$$

Определяющая скорость, которая используется в формуле для расчета является средней расходной скоростью пара в зазоре:

$$\omega_{\text{yn}} = \frac{G_{\text{yn}} \cdot v_{\text{yn}}}{f_{\text{yn}}}.$$

Расход пара через уплотнения:

$$G_{\text{yn}} = 316,2 \cdot f_{\text{yn}} \cdot \mu_{\text{yn}} \sqrt{\frac{P_0^2 - P_1^2}{P_0 \cdot v_0 \cdot z}}.$$

Рабочая площадь уплотнений:

$$f_{\text{yn}} = \Pi \cdot d_{\text{yn}} \cdot \delta.$$

Определяющая температура – средняя по длине уплотнения температура среды.

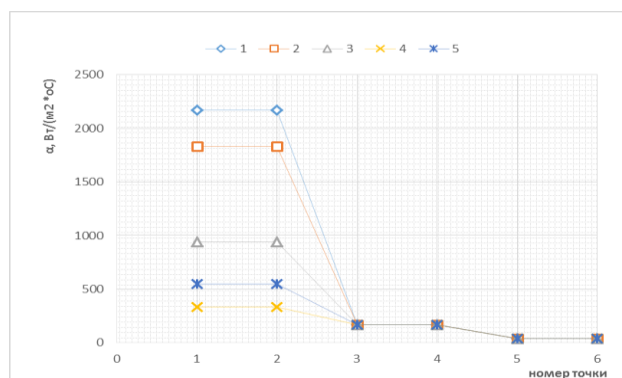
На участке 1-2 (рис. 1) количество зубцов $z = 48$, на участке 3-4 $z = 18$, на участке 5-6 $z = 6$.

При $\frac{G}{G_0} = 0,06$ формула для G_{yn} имеет другой

вид, потому что расходы пара слишком малы, а давление пара на выходе из ЦВД меньше, чем давление уплотняющего пара в коллекторе:

$$G_{\text{yn}} = 316,2 \cdot f_{\text{yn}} \cdot \mu_{\text{yn}} \sqrt{\frac{(P_{\text{кол}})^2 - P_0^2}{P_{\text{кол}} \cdot v_{\text{кол}}}}.$$

Граничные условия по оценке теплового и напряженно-деформированного состояния металла уплотнений роторов паровой турбины К-1000/60-3000 для концевых уплотнений ЦВД при пуске из холодного состояния при различных относительных расходах пара представлены на рис. 4. Аналогичные данные получены для пуска из неостывшего и горячего состояния.



1 - $G_{n1}^{cm}/G_{n01}^{cm} = 1,0$; 2 - 0,8; 3 - 0,4; 4 - 0,2; 5 - 0,06

Рисунок 4. Зависимость коэффициента теплоотдачи α для различных участков концевых уплотнений по длине ротора ВД

Из рис. 4 видно, что максимальные значения коэффициента теплоотдачи отмечены для участка 1-2,

что связано с изменением параметров пара при изменении режимов пуска. При номинальном режиме $\alpha = 2168,8 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$.

Для участков 3-4 и 5-6 реализована другая схема подачи пара на уплотнения, которая не зависит от режимов пуска. Следует также отметить более низкий уровень коэффициентов теплоотдачи для этих участков.

Результаты расчетов по коэффициенту теплоотдачи α для участка 1-2 ротора ВД для трех тепловых состояний оказалось возможным представить в виде зависимости от времени пуска, что позволяет для каждого момента времени рассчитать тепловое состояние ротора при пуске из различных тепловых состояний (рис. 5).

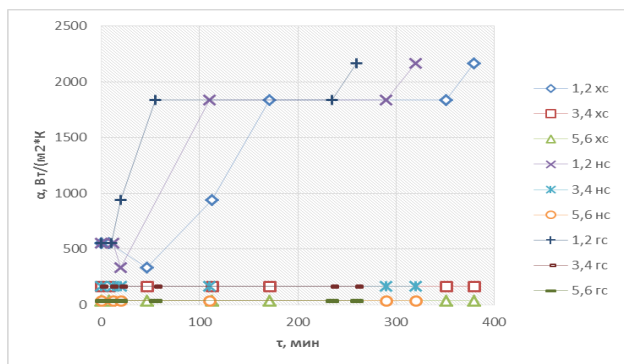


Рисунок 5. Зависимость коэффициента теплоотдачи для участка 1-2 РВД от времени пуска при различных тепловых состояниях оборудования

На рис. 6 представлены данные по коэффициенту теплоотдачи для участка 1-2 РВД в зависимости от относительного расхода пара на турбину. На этом графике нанесены данные для пуска из трех тепловых состояний.

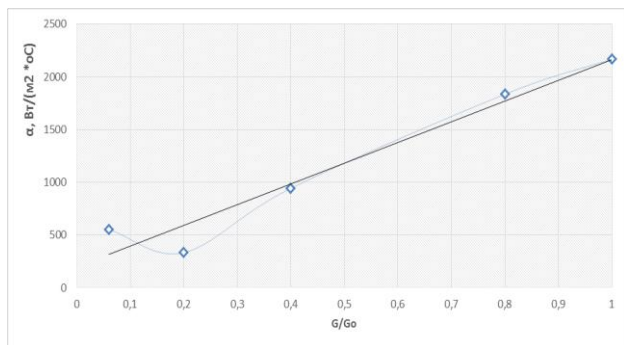


Рисунок 6. Зависимость коэффициента теплоотдачи для участка 1-2 РВД от относительного расхода пара на турбину.

Приведенные на рис. 6 данные дают возможность определить коэффициент теплоотдачи для любых относительных расходов пара на турбину при пусках из любого теплового состояния.

Аппроксимирующая зависимость имеет вид:

$$\alpha = 1966 \cdot \left(\frac{G_{nl}^{cm}}{G_{n01}^{cm}} \right) + 198,6.$$

Расчетная зависимость достаточно точно обобщает полученные расчетные данные. Отклонение отмечается при значениях $(G_{nl}^{ct}/G_{n01}^{ct}) < 0,2$, что связано с изменением схемы подачи пара на уплотнения.

Аналогичные расчеты по теплообменным характеристикам были проведены для уплотнений РНД.

Для участков ротора низкого давления с прямоточными концевыми уплотнениями уравнения конвективного теплообмена использовались в виде [17]:

$$Nu = 0,256 \cdot Re^{0,6} \left(\frac{s}{\delta} \right)^{-0,085} \left(\frac{h}{\delta} \right)^{-0,075} Pr^{0,43},$$

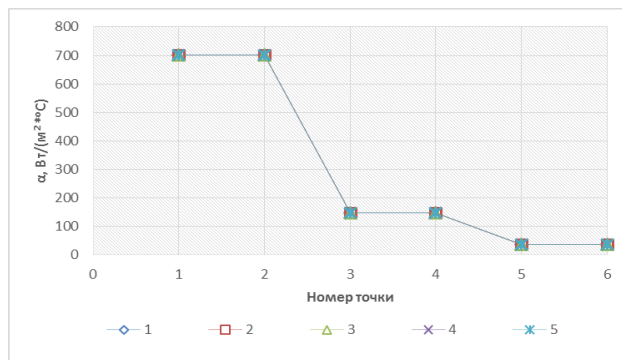
$$Re = 2,4 \cdot 10^2 \div 8,7 \cdot 10^3,$$

$$Nu = 0,0454 \cdot Re^{0,8} \left(\frac{s}{\delta} \right)^{-0,1} \left(\frac{h}{\delta} \right)^{-0,1} Pr^{0,43},$$

$$Re = 8,7 \cdot 10^3 \div 1,7 \cdot 10^5.$$

Результаты расчетов представлены на рис. 7.

Как видно из рис. 7, в связи с принятым в работе предположением о постоянстве давления пара в конденсаторе независимо от режимов пуска и теплового состояния оборудования, расчетный коэффициент теплоотдачи также не зависит от режима пуска и относительного расхода пара. Максимальное значение коэффициента теплоотдачи отмечено на участке 1-2 и составляет $\alpha = 701,5 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$.



1 - $G_{nl}^{cm}/G_{n01}^{cm} = 1,0$; 2 - 0,8; 3 - 0,4; 4 - 0,2; 5 - 0,06.

Рисунок 7. Зависимость коэффициента теплоотдачи α по длине ротора НД для различных расчетных участков и относительных расходов пара

V. ВЫВОДЫ

Выполненные расчеты граничных условий концевых уплотнений ротора высокого давления при пусках из холодного, неостывшего и горячего состоя-

ний с учетом изменения режимных параметров показывают, что величина коэффициента теплоотдачи увеличивается с ростом относительного расхода пара и имеет максимальное значение при номинальном режиме.

Получена аппроксимирующая зависимость, которая позволяет оценить максимальную величину коэффициента теплоотдачи на начальном участке уплотнения ротора высокого давления, в зависимости от изменения относительного расхода пара в диапазоне 0,4 – 1,0.

Величина коэффициента теплоотдачи на участке концевых уплотнений ротора низкого давления имеет максимальное значение на начальном участке ротора и не зависит от расхода пара. Максимальная величина коэффициента теплоотдачи для РВД $\alpha = 2168,8$ Вт/(м²·К), для РНД $\alpha = 701,5$ Вт/(м²·К).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Тепловая энергетика – новые вызовы времени / Под общ. Редакцией П. Омеляновского. – Львов: НВФ «Украинские технологии», 2010. – 690 с.
- [2] IAEA Power Reactor Information System. Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up 2050. Ref. Data Ser. 1, 2011 Td. Vienna:IAEA, 2011.
- [3] World Energy Outlook 2011. OECD/IEA, 2011.
- [4] European Development Program for a high Performance Light Water Reactor (HPLWR) / G. Heusener, U. Muller, T. Schulenberg, D.A. Scuarer // 17-th Congress of World Energy Council. Huston. Texas. Sept. 13-18. 1998. – Vol. 2. – P. 23-28.
- [5] НД МПЕ України. Контроль металу і продовження терміну експлуатації основних елементів котлів, турбін і трубопроводів теплових електростанцій. – Типова інструкція. СОУ-Н МПЕ 40.17.401:2004. – Офіц. вид. – К.: ГРІФРЕ: М-во палива та енергетики України, 2005. – 76 с. – (Нормативний документ Мінпаливенерго України, Типова інструкція).
- [6] РТМ 108.021.103. Детали паровых стационарных турбин. Расчёт на малоцикловую усталость [Текст]. – М., 1985. – № АЗ–002/7382. – 49 с.
- [7] РД 34.17.440-96. Методические указания о порядке проведения работ при оценке индивидуального ресурса паровых турбин и продлении срока их эксплуатации сверх паркового ресурса [Текст]. – М., 1996. – 98 с.
- [8] ГОСТ 24 277-91 "Турбины паровые стационарные для ТЭС. Общие технические требования. Транспортировка и хранение. Гарантии изготовления".
- [9] Розпорядження Кабінету міністрів України від 29 квітня 2004 року № 263-р «Про схвалення комплексної програми робіт з продовження терміну експлуатації діючих енергоблоків атомних електростанцій». Режим доступу: www.kmu.gov.ua. – Заглавие с экрана – 10.01.2016.
- [10] Паровые и газовые турбины для электростанций / А.Г. Костюк, В.В. Фролов, А.Е. Булкин, А.Д. Трухний; под. ред. А.Г. Костюка. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008. – 556 с.
- [11] Трояновский Б.М. Паровые и газовые турбины атомных электростанций / Б.М. Трояновский, Г.А. Филиппов, А.Е. Булкин. – М.: Энергоатомиздат, – 1985. – 450 с.
- [12] Тепловое состояние роторов и цилиндров паровых и газовых турбин / Под.ред. К.П. Селезнева, А.И. Таранина, В.Г. Тырышкина. – М. – Л.: Машиностроение, 1964. – 284 с.
- [13] Капинос В.М. Теплообмен в ступенчатом лабиринтовом уплотнении / В.М. Капинос, Л.А. Гура // Теплоэнергетика, 1973. – № 6. – С.22-25.
- [14] РТМ 108.020.33-86. Уплотнения лабиринтные стационарных паровых и газовых турбин и компрессоров. Проектирование и расчет. НПО ЦКТИ, 1988. – 73 с.
- [15] Бондаренко Г.А. Моделирование расходных характеристик лабиринтных уплотнений с гладким валом [Текст] / Г.А. Бондаренко, В.Н. Бага // Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. 2016. – № 8 (1180). – С. 60-64.
- [16] Глощапов В.Н. Характеристики течения пара в концевых уплотнениях ЦВД на этапе набора вакуума [Текст] / В.Н. Голощапов, Ю.О. Бахмутская // Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. 2016. – № 8 (1180). – С. 122-128.
- [17] Сахаров А.М. Первые результаты использования систем уплотнений сотовой конструкции взамен уплотнений традиционного типа в паровых турбинах ТЭЦ № 16 ОАО «Мосэнерго» [Текст] / А.М. Сахаров, С.В. Ушинин, Ю.П. Малютин, И.А. Лунин // Энергосбережение и водоподготовка, 2005. – № 2 (34). – С. 30-35.
- [18] Модернизация схемы концевых уплотнений. НПО ЦКТИ. Режим доступа www.ckts.ru/consolidation.html.
- [19] Пасько В.П. Модернизация концевых уплотнений ЦНД К-1000-60/1500-2 [Текст] / В.П. Пасько, В.Г. Бекетов // Глобальная ядерная безопасность. – 2012. – № 4 (5). – С. 74-81.
- [20] Резинских А.Ф. Продление ресурса турбин Т-250/300-240 УТМЗ в ОАО «Мосэнерго» [Текст] / А.Ф. Резинских, Г.Д. Авгуцкий, М.В. Федоров, С.А. Быков // Электрические станции. – 2006. – № 6. – С. 26–31.
- [21] Семук, П. В. Оптимизация систем и режимов работы концевых уплотнений паровых турбин / П. В. Семук; науч. рук. Н. В. Пантелей // Актуальные проблемы энергетики: материалы 72-й науч-

- но-технической конференции студентов и аспирантов / Белорусский национальный технический университет, Энергетический факультет. – Минск: БНТУ, 2016. – С. 546-549.
- [22] Шве́ц И.Т. Воздушное охлаждение газовых турбин / И.Т. Шве́ц, Е.П. Дыбан. – Киев: Наукова думка, 1974. – 568 с.
- [23] Stolz G. Numerical solutions to an invers problem of heat conduction for simple shapes // Trans/ ASME C. J. Heat Transfer. – 1970. – 82. - № 1. P. 20-26
- [24] Ueda T., Harada G. Experiment of heat transfer on surfices with transverse fins for flow direction // Bull. JSME. – 1964. – 7, № 28. – P. 759-768.
- [25] Инструкция по эксплуатации «Турбина паровая № 1. ТЦ.0166.ИЭ-10» энергоблока № 1 К-1000-60/3000.
- [26] Matsson, J. An Instruction to Solid Works Flow Simulation 2015 [Text] / SDC Publications (July 22, 2015) p. 350, ISBN-10: 1585039349.
- [27] РТМ 108.020.16-83. Расчет температурных полей роторов и корпусов паровых турбин. – Ленинград, 1983. – НПО ЦКТИ. – 112 с.

Стаття надійшла до редакції 12.04.2018

ГРАНИЧНІ УМОВИ ТЕПЛООБМІНУ В КІНЦЕВИХ УЩІЛЬНЕННЯХ ЦВТ ТА ЦНТ ТУРБИНИ К-1000-60/3000

ЧЕРНОУСЕНКО О.Ю.

д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри теплоенергетичних установок теплових і атомних електростанцій, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна; e-mail: chernousenko20a@gmail.com

БУТОВСЬКИЙ Л.С.

канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри теплоенергетичних установок теплових і атомних електростанцій, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»; м. Київ, Україна; e-mail: home_129@mail.ru

НІКУЛЕНКОВА Т.В.

канд. техн. наук, доцент кафедри теплоенергетичних установок теплових і атомних електростанцій, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»; м. Київ, Україна; e-mail: tetyana.nikulenкова@gmail.com

БЕДНАРСЬКА І.С.

магістрант кафедри теплоенергетичних установок теплових і атомних електростанцій, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»; м. Київ, Україна; e-mail: innabednarska1@gmail.com

Мета роботи. Дослідження режимів роботи волого-парової турбіни потужністю 1000 МВт, розробка методики розрахунку і визначення граничних умов теплообміну для кінцевих ущільнень роторів високого та низького тиску в змінних режимах роботи енергоблоків для подальшого виконання оцінки малоциклової втоми роторів турбіни К-1000-60/3000, визначення ступеня можливого пошкодження основного металу, розрахунок залишкового напруження, а також індивідуального ресурсу.

Методи дослідження. При моделюванні геометрії ущільнень на першому етапі перевірконого розрахунку розроблена методика створення просторових конструкцій елементів турбомашин з застосуванням для РВД і РНД програмного продукту Solid Works.

Отримані результати Виконано розрахунки граничних умов ділянок кінцевих ущільнень РВТ і РНТ при пусках з холодного, неостиглого і гарячого станів з урахуванням зміни режимних параметрів. Встановлено, що значення коефіцієнту теплообміну збільшується з ростом потужності турбіни і має максимальну величину при номінальному режимі. Максимальна величина коефіцієнта тепловіддачі для РВТ $\alpha = 2168,8 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, для РНТ $\alpha = 701,5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Отримано залежність коефіцієнту тепловіддачі для початкової ділянки РВТ від відносної витрати пари на турбіну в діапазоні 0,4 – 1,0.

Наукова новизна. Авторами вперше проведено розрахунки значень коефіцієнту тепловіддачі для кінцевих ущільнень ЦВТ і ЦНТ для трьох видів пуску – із холодного, неостиглого і гарячого станів в залежності від теплового стану роторів і відносної витрати пари на турбіну. Отримана апроксимуюча залежність коефіцієнту тепловіддачі для початкової ділянки РВТ від відносної витрати пари на турбіну дає можливість виконувати необхідні розрахунки при різних видах пусків турбіни і температурному стані роторів.

Практична цінність. Отримані результати розрахунків щодо коефіцієнтів тепловіддачі на ділянках кінцевих ущільнень РВТ і РНТ при пусках з різних теплових станів дають можливість розрахувати термонапружений стан роторів турбіни і оцінити величину мало циклової втоми роторів ЦВТ і ЦНТ.

Ключові слова: турбіна парова; переднє кінцеве ущільнення; заднє кінцеве ущільнення; пуск з холодного, гарячого, неостиглого стану; теплообмін в ущільненнях; граничні умови.

BOUNDARY CONDITIONS OF HEAT EXCHANGE IN THE LACE SEALS OF CYLINDERS OF HIGH AND LOW PRESSURE OF TURBINE K-1000-60 / 3000

- CHERNOUSENKO O. YU. Sci.D, Professor, Head of the Department of Thermal Power Plants of Thermal and Nuclear Power Plants, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute. Igor Sikorsky», Kiev, Ukraine; e-mail: chernousenko20a@gmail.com
- BUTOVSKYI L.S. Ph.D, Associate professor, Associate professor of the Department of Thermal Power Plants of Thermal and Nuclear Power Plants, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute. Igor Sikorsky», Kiev, Ukraine; e-mail: home_129@mail.ru
- NIKULENKOVA T. V. Ph.D, Associate professor of the Department of Thermal Power Plants of Thermal and Nuclear Power Plants, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute. Igor Sikorsky», Kiev, Ukraine; e-mail: tetyana.nikulenкова@gmail.com
- BEDNARSKA I.S. graduate student of the Department of Thermal Power Plants of Thermal and Nuclear Power Plants, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute. Igor Sikorsky», Kiev, Ukraine; e-mail: innabednarska1@gmail.com

Purpose. Investigation of operating conditions of a wet-steam turbine with a capacity of 1000 MW, development of a calculation procedure and determination of the boundary conditions for heat transfer for end seals of high and low pressure rotors in the variable operating modes of power units for the subsequent evaluation of low cycle fatigue of the K-1000-60 / 3000 turbine rotors, determining the degree of possible damage to the main metal, calculating the residual operating time, as well as an individual resource.

Methodology. When modeling the geometry of the seals, the first stage of verification calculation developed a technique for creating spatial structures of turbomachine elements using the Solid Works software and the mathematical calculation method, which is embedded in it (the finite element method) for the RVD and RND.

Findings. The boundary conditions of the sections of the end seals of the RVD and RND at the starts from cold, non-heated and hot states are calculated taking into account the change in the regime parameters. It is established that the value of the heat transfer coefficient increases with increasing turbine power and has a maximum value at the nominal mode. The maximum value of the heat transfer coefficient for the RVD is $\alpha = 2168.8 \text{ W} / (\text{m}^2 \text{ K})$, for RND $\alpha = 701.5 \text{ W} / (\text{m}^2 \cdot \text{K})$. An approximating dependence of the heat transfer coefficient for the initial section of the high-pressure rotor on the relative steam consumption on the turbine in the range 0.4-1.0 has been obtained.

Originality. The authors for the first time calculated the values of the heat transfer coefficient for the end seals of high and low pressure rotors for three types of starting-from a cold, non-heated and hot state, depending on the thermal state of the rotors and the relative steam flow to the turbine. The approximated dependence of the heat transfer coefficient for the initial section of the high-pressure rotor on the relative steam consumption on the turbine in the range 0.4-1.0 makes it possible to perform the necessary calculations for other types of starts and the temperature states of the rotors.

Practical value. The results of calculating the heat transfer coefficient at the sections of the RVD and RND end seals during starts from different thermal states make it possible to calculate the thermally stressed state of the turbine rotors and to estimate the value of the low-cycle fatigue of the CVP and LPC rotors.

Keywords: steam turbine; front end seal; rear end seal; starting from a cold, hot, unfired condition; heat exchange in seals; border conditions.

REFERENCES

- [1] P. Omeljanovskyi. (2010). Teplovaja jenergetika – novye vyzovy vremeni. L'vov: NVF «Ukrainskie tehnologii», 690. [in Russian].
- [2] IAEA Power Reactor Information System. (2011). Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up 2050. Td. Vienna: IAEA. [in English].
- [3] World Energy Outlook (2011). OECD/IEA. [English].
- [4] G. Heusener, U. Muller, T. Schulenberg, D.A. Scurer. (1998). European Development Program for a high Performance Light Water Reactor (HPLWR).

- 17-th Congress of World Energy Council. Huston, Texas, 2, 23-28. [in English].
- [5] ND MPE Ukraïni. Kontrol' metalu i prodovzhennja terminu ekspluatatsii osnovnih elementiv kotliv, turbin i truboprovodiv teplovih elektrostancij. (2005). Tipova instrukcija. SOU-N MPE 40.17.401:2004. – Ofic. vid. – K.: GRIFRE: M-vo paliva ta energetiki Ukraïni. (Normativnij dokument Minpalivenergo Ukraïni, Tipova instrukcija), 76. [in Ukrainian].
- [6] RTM 108.021.103 (1985). Detali parovyh stacionarnyh turbin. Raschjot na malociklovuju ustalost'. [in Russian].
- [7] RD 34.17.440-96. (1996). Metodicheskie ukazaniya o porjadke provedeniya rabot pri ocenke individual'nogo resursa parovyh turbin i prodlenii sroka ih jekspluatatsii sverh parkovogo resursa. [in Russian].
- [8] GOST 24 277-91 "Turbiny parovye stacionarnye dlja TJeS. Obshhie tehicheskie trebovaniya. Transportirovka i hranenie. Garantii izgotovleniya" [in Russian].
- [9] Rozporjadzhennja Kabinetu ministriv Ukraïni vid 29 kvitnja 2004 roku № 263-r. (2016). "Pro shvalennja kompleksnoi programi robiz z prodovzhennja terminu ekspluatatsii dijuchih energoblokov atomnih elektrostancij". www.kmu.gov.ua. [in Ukrainian].
- [10] A.G. Kostjuk, V.V. Frolov, A.E. Bulkin, A.D. Truhnij, pod. red. A.G. Kostjuka. (2008). Parovye i gazovye turbiny dlja jelektrostancij. Moscow, Izdatel'skij dom MJeI, 556. [in Russian].
- [11] Trojanovskij B.M., G.A. Filippov, A.E. Bulkin. (1985). Parovye i gazovye turbiny atomnyh jelektrostancij. Moscow, Jenergoatomizdat, 450. [in Russian].
- [12] Pod.red. K.P. Selezneva, A.I. Taranina, V.G. Tyryshkina. (1964). Teplovoe sostojanie rotorov i cilindrov parovyh i gazovyh turbin, Leningrad, Mashinostroenie, 284. [in Russian].
- [13] Kapinos V.M., L.A. Gura. (1973). Teploobmen v stupenchatom labirintovom uplotnenii, *Teplojenergetika*, 6, 22-25. [in Russian].
- [14] RTM 108.020.33-86. (1988). Uplotneniya labirintnye stacionarnyh parovyh i gazovyh turbin i kompressorov. Proektirovanie i raschet. NPO CKTI. [in Russian].
- [15] Bondarenko G.A., Baga, V.N. (2016). Modelirovanie rashodnyh karakteristik labirintnyh uplotnenij s gladkim valom. *Visnik NTU "HPI". Seriya: Energetichni ta teplotekhnichni protcesm i ustatkuvannia*, 8, 1180, 60-64. [in Russian].
- [16] Glolshhapor V.N., Bahmutskaja, Ju.O. (2016). Harakteristiki techeniya para v koncevix uplotnenijah CVD na etape nabora vakuuma. *Visnik NTU "HPI". Seriya: Energetichni ta teplotekhnichni protcesy i ustatkuvannia*, 8, 1180, 122-128. [in Russian].
- [17] Saharov A.M., S.V. Ushinin, Ju.P. Maljutin, I.A. Lunin. (2005). Pervye rezul'taty ispol'zovaniya sistem uplotnenij sotovoj konstrukcii vzamin uplotnenij tradicionnogo tipa v parovyh turbinah TJeC № 16 OAO "Mosjenergo". *Jenergozberezenie i vodopodgotovka*, 2, 34, 30-35 [in Russian].
- [18] NPO CKTI. (2018). *Modernizacija shemy koncevix uplotnenij*. Retrieved from www.ckts.ru/consolidation.html.
- [19] Pas'ko V.P., Beketov, V.G. (2012). Modernizacija koncevix uplotnenij CND K-1000-60/1500-Global'naja jadernaja bezopasnost'. 5, 74-81 [in Russian].
- [20] Rezinskih A.F., G.D. Avguckij, M.V. Fedorov, S.A. Bykov. (2006). Prodlenie resursa turbin T-250/300-240 UTMZ v OAO "Mosjenergo". *Elektricheskie stantcii*, 6, 26-31. [in Russian].
- [21] Semuk, P.V., Pantelij, N.V. (2016). Optimizacija sistem i rezhimov raboty koncevix uplotnenij parovyh turbin. Aktual'nye problemy jenergetiki : materialy 72-j nauchno-tehnicheskoy konferencii studentov i aspirantov. Belorusskii nacionalnyi tekhnicheskii universitet. Minsk. BNTU, 546-549. [in Russian].
- [22] Shvec I.T., Dyban, E.P. (1974). Vozdushnoe ohlazhdenie gazovyh turbin. Kiev. Naukova dumka, 568. [in Russian].
- [23] Stolz G. (1970). Numerical solutions to an invers problem of heat conduction for simple shapes. *Trans/ASME C. J. Heat Transfer*, 1, 20-26. [in English].
- [24] Ueda T., Harada G. (1964). Experiment of heat transfer on surfices with transverse fins for flow direction. *Bull. JSME*, 28, 759-768. [in English].
- [25] Instrukcija po jekspluatatsii "Turbina parovaja № 1. TC.0166.IJe-10" jenergobloka № 1 K-1000-60/3000.
- [26] Matsson, J. (2015). An Instruction to Solid Works Flow Simulation. SDC Publications, 350. [in English].
- [27] (1983). RTM 108.020.16-83. Raschet temperaturnyh polej rotorov i korpusov parovyh turbin. Leningrad. NPO CKTI, 112. [in Russian].

УМОВИ ТЕПЛООБМІНУ В КОНТЕЙНЕРІ СУХОГО ЗБЕРІГАННЯ ВІДПРАЦЬОВАНОГО ЯДЕРНОГО ПАЛИВА ЕНЕРГЕТИЧНИХ РЕАКТОРІВ

АЛЬОХІНА С.В.

канд. техн. наук, старший науковий співробітник, старший науковий співробітник Інституту проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України, доцент кафедри теплофізики, молекулярної фізики та енергоефективності Харківського національного університету імені В.Н.Каразіна, м. Харків, Україна, e-mail: alyokhina@karazin.ua

Мета роботи. Обґрунтування безпеки експлуатації сухого сховища відпрацьованого ядерного палива енергетичних реакторів ВВЕР-1000 Запорізької АЕС шляхом проведення чисельних досліджень теплових процесів в контейнері сухого зберігання.

Методи дослідження. Математичне моделювання, чисельне розв'язання прямих спряжених та обернених задач теплообміну.

Отримані результати. Отримані розподіл температур та коефіцієнтів тепловіддачі на поверхнях нагріваних труб в корзині зберігання відпрацьованих паливних збірок енергетичних реакторів ВВЕР-1000 Запорізької АЕС. Із застосуванням ітеративної методики моделювання теплових процесів отримані детальні поля температур відпрацьованих паливних збірок в корзині зберігання. Визначені максимальні температури в кожній з відпрацьованих збірок та ідентифіковані місця розташування найбільш гарячих твілів.

Наукова новизна. Вперше із застосуванням ітеративної методики моделювання теплових процесів при сухому зберіганні відпрацьованого ядерного палива отримано детальну інформацію про теплові процеси в середині корзини з відпрацьованим паливом в нормальних умовах експлуатації.

Практична цінність. Підтверджено безпеку зберігання відпрацьованого ядерного палива реакторів ВВЕР-1000 у сухому сховищі Запорізької АЕС. Отримані результати доцільні для використання при створенні науково-методологічних основ безпеки сухого зберігання відпрацьованого палива енергетичних реакторів, а також корисні при розробці та впровадженні конструктивних та технологічних рішень стосовно створення або модернізації обладнання зберігання відпрацьованого ядерного палива енергетичних реакторів.

Ключові слова: атомна електроенергетика; відпрацьоване ядерне паливо; вентильований контейнер сухого зберігання; відпрацьовані паливні збірки; теплові процеси; спряжені задачі теплообміну; коефіцієнт тепловіддачі

І. ВСТУП

На сучасному етапі розвитку енергетичної галузі України все більшу актуальність набувають питання енергобезпеки та енергонезалежності. Традиційні для України джерела енергії – вугілля та газ – відходять на другий план та постійно зростає частка атомних електростанцій у загальному видобутку електроенергії. Цілком природно, що маючи велику долю виробництва електроенергії атомними станціями (на сьогодні більш ніж 50%), для України постає проблема поводження з відпрацьованим ядерним паливом (ВЯП). Донедавна проблема поводження з відпрацьованим паливом в Україні вирішувалась шляхом вивезення ВЯП на переробку до Російської федерації, що потребувало значних фінансових витрат та знижувало рівень енергонезалежності нашої країни. Такий стан речей спонукав розробку так званого «відкладеного» рішення – тривалого (50 років і більше) зберігання ВЯП у сухих сховищах. Лідером у вирішенні проблеми поводження з ВЯП в Україні стала найбільша в Європі Запорізька АЕС, на території якої було створене найбільше в Європі сухе сховище відпрацьова-

ного ядерного палива (ССВЯП).

Створення і введення в експлуатацію на Запорізькій АЕС ССВЯП, як складової енергонезалежності України, та подальше здійснення його безпечного функціонування неможливе без науково-технічного супроводу, який включає в себе розробку, вдосконалення методик визначення параметрів ядерної, радіаційної безпеки та комплексу заходів щодо дотримання безпечних теплових режимів експлуатації сховища.

ІІ. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Роботи по визначенню теплового стану відпрацьованих паливних збірок при сухому зберіганні проводяться багатьма науковцями світу [1]–[6], особливо у тих країнах, де активно використовується технологія сухого зберігання (США, Японія та ін.). Серед усіх підходів до моделювання теплового стану відпрацьованих паливних збірок, що застосовуються, можна виділити два основних.

Відповідно до першого і найбільш розповсюдженого підходу при моделюванні теплових процесів при сухому зберіганні відпрацьованого ядерного па-

лива збірки розглядаються як суцільні конструкції з відповідними еквівалентними теплофізичними властивостями [1], [2] – [5]. У такого підходу є свої позитивні та негативні риси. Розглянемо їх детальніше.

При розробці критеріїв безпеки сухих сховищ ВЯП, одним з яких є температура оболонок твелів, що входять до складу паливних збірок, важливим є створення таких умов експлуатації, коли гарантовано не відбудеться занадто велике підвищення температури, що може зруйнувати оболонку твела, та викликати спонтанну ланцюгову реакцію. Для таких задач часто використовується підхід, коли у тепловий розрахунок свідомо закладаються припущення, які зрештою завищують максимальні температури у відпрацьованих паливних збірках. Якщо критерії безпеки створені із застосуванням результатів такого розрахунку то під час їх дотримання створюється своєрідний запас температур, який в умовах експлуатації дає додаткові гарантії безпеки.

При аналізі теплової безпеки часто використовують методи, коли збірки представлені суцільними теплогенеруючими конструкціями з еквівалентними теплофізичними властивостями. Як було зазначено вище, такий підхід створює додаткові гарантії безпеки, оскільки результати дещо завищені через використання еквівалентного коефіцієнту теплопровідності. Це, безумовно, корисно при створенні критеріїв безпеки, але не дає детального уявлення про температури компонентів збірки.

Складністю цього підходу є також необхідність визначення еквівалентних теплофізичних властивостей. Оскільки тіла, що розглядаються як суцільні, насправді є поєднанням твердотільних елементів з різними теплофізичними властивостями, а в деяких випадках поєднанням рухомого середовища та твердотільних елементів. Останній випадок найбільш складний, оскільки за таких умов в тілі необхідно розглядати не лише процеси теплопровідності, але й конвективний перенос тепла.

Для визначення еквівалентного коефіцієнту теплопровідності використовують методологію розв'язання обернених задач теплообміну [7], [8] або обернених спряжених задач теплообміну [9], яка потребує значної кількості чисельних розрахунків та складна у реалізації.

Незважаючи на перелічені труднощі використання геометричних спрощень є дуже розповсюдженим при проведенні інженерних розрахунків, оскільки значно економить обчислювальні ресурси та дає прийнятні результати.

Альтернативою цьому підходу є детальний розгляд конструкції того чи іншого елемента [10], [11]. Такий підхід потребує значної кількості комп'ютерного часу через необхідність оперувати великим обсягом даних. Для того, щоб прискорити розрахунки часто розглядають задачу у двовимірній постановці, тобто моделюють найбільш термонапру-

жену частину відпрацьованої паливної збірки чи контейнеру зберігання [3], [4], [6], [7]. Однак у такій постановці неможливо врахувати усі особливості теплообміну, зокрема конвективний перенос тепла.

Для детального уявлення про теплові процеси при сухому зберіганні відпрацьованого ядерного палива необхідно використовувати методологію, яка врахувала би позитивні риси підходів, що зазначені вище. Така методологія була створена за участю автора [12] та дозволяє визначити тепловий стан кожної з відпрацьованих паливних збірок та місця розташування найбільш гарячих твелів в збірці для більш ефективного аналізу теплової безпеки зберігання ВЯП.

III. МЕТА РОБОТИ

Обґрунтування безпеки експлуатації сухого сховища відпрацьованого ядерного палива енергетичних реакторів ВВЕР-1000 Запорізької АЕС шляхом проведення чисельних досліджень теплових процесів в контейнері сухого зберігання.

IV. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Вентильований контейнер зберігання, що використовується на Запорізькій АЕС має структуру, наведену на рис. 1 [13]. Конструктивно контейнер призначений для послаблення нейтронного і гамма-випромінювання ВЯП, протидії розповсюдженню радіонуклідів ВЯП в навколишнє середовище і забезпечення ефективного тепловідведення від багатомісної герметичної корзини (БГК) з 24 ВТВЗ. Вентиляційне повітря потрапляє у нижні вентиляційні канали, проходить по каналу між стінкою контейнера та БГК, охолоджуючи останню. Герметична корзина з ВТВЗ заповнена інертним газом – гелієм для забезпечення рівномірного і ефективного тепловідведення, тиск внутрішнього газового середовища протягом терміну зберігання підтримується на рівні близькому до 1 атмосфери.

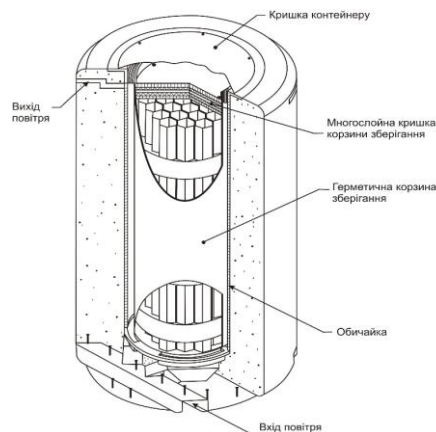


Рисунок 1. Структура вентильованого контейнера зберігання

Тепловиділення ВТВЗ зменшується протягом

років зберігання за рахунок розпаду продуктів поділу і актиноїдів, які накопичилися за час кампанії в ВЯП. Розподіл тепловиділення по висоті ВТВЗ при моделюванні припускався рівномірним, його рівень визначався відповідно до [14], [15].

Для розрахункового дослідження теплового стану ВКЗ-ВВЕР температура зовнішнього повітря приймалася рівною 24 °С, що відповідає умовам нормальної експлуатації.

Зміна зовнішніх впливів на ССВЯП є дуже повільною порівняно з розповсюдженням тепла в твердих тілах і тепла і напруг в рухомому середовищі, тому у процесі моделювання доцільно використовувати деякі осереднені у часі погодні умови. Зважаючи на це теплові процеси в об'єкті дослідження можна розглядати як квазістаціонарні. Математична модель у цьому випадку прийме наступний вигляд:

– рівняння нерозривності

$$\operatorname{div}(\rho \mathbf{v}) = 0,$$

де ρ – щільність, $\mathbf{v}$ – вектор швидкостей;

– рівняння руху Нав'є–Стокса

$$\rho(\mathbf{v} \times \operatorname{grad} \mathbf{v}) = -\operatorname{grad} \left(p + \frac{2}{3} \mu_{ef} \operatorname{div} \mathbf{v} \right) + 2 \operatorname{div}(\mu_{ef} \dot{\mathbf{S}}) + \rho \mathbf{g},$$

де p – тиск; μ_{ef} – ефективна (з урахуванням турбулентної складової μ_t) динамічна в'язкість; $\dot{\mathbf{S}}$ – тензор швидкостей деформації, $\mathbf{g}$ – прискорення вільного падіння;

– рівняння енергії

$$c_p \rho(\mathbf{v} \times \operatorname{grad} T) - \mathbf{v} \times \operatorname{grad} p = \operatorname{div}(\lambda_{ef} \operatorname{grad} T)$$

де c_p – питома теплоємність при постійному тиску; λ_{ef} – ефективна (з урахуванням турбулентної складової λ_t) теплопровідність, T – температура газу;

– рівняння теплопровідності

$$\operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) + q_V = 0,$$

де q_V – потужність об'ємного джерела теплоти;

– рівняння моделі турбулентності

$$\operatorname{div}(\rho k \mathbf{v}) = \operatorname{div} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \operatorname{grad} k \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon,$$

$$\operatorname{div}(\rho \varepsilon \mathbf{v}) = \operatorname{div} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \operatorname{grad} \varepsilon \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{2\varepsilon} G_b) - C_{3\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k},$$

де k – турбулентна кінетична енергія, ε – швидкості її дисипації, G_k – член, що описує генерацію турбулентної кінетичної енергії, що викликана наявністю градієнтів швидкості (відповідно до гіпотези Бусінеска G_k

$= \mu_t S^2$); G_b – член, що описує генерацію турбулентної кінетичної енергії, що викликана дією архімедових сил (для ідеального газу:

$$G_b = - \frac{\mu_t}{\rho Pr_t} \left(g_x \frac{\partial p}{\partial x} + g_y \frac{\partial p}{\partial y} + g_z \frac{\partial p}{\partial z} \right);$$

де $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, $C_{3\varepsilon}$ – константи моделі, що дорівнюють відповідно 1,44, 1,92, 0,09; $\sigma_k = 1,0$ – турбулентне число Прандтля для k ; $\sigma_\varepsilon = 1,3$ – турбулентне число Прандтля для ε .

До математичної моделі також включено рівняння променевого теплообміну:

$$Q_{12} = \sigma_0 \varepsilon_{np} (T_1^4 - T_2^4) H_{12}$$

де $\sigma_0 = 5,672 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²К⁴) – постійна Стефана-Больцмана; ε_{np} – приведена ступінь чорноти; T_1 – температура поверхні одного (більш нагрітого) тіла; T_2 – температура поверхні другого (менш нагрітого) тіла; H_{12} – площа взаємної поверхні опромінювання, яка може бути знайдена з рівняння

$$H_{12} = \int_{F_1} dF_1 \int_{F_2} \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{\pi R_{12}^2} dF_2,$$

де F_1 , F_2 – площа поверхонь, що беруть участь у теплообміні; θ_1 і θ_2 – кути між прямою, що з'єднує центри елементарних площадок dF_1 , та dF_2 , та відповідними нормаллями до цих площадок; R_{12} – відстань між цими елементарними площадками.

Приведена ступінь чорноти може бути визначена як

$$\varepsilon = [1 + (1/\varepsilon_1 - 1) \cdot \varphi_{12} + (1/\varepsilon_2 - 1) \cdot \varphi_{21}]^{-1}$$

де ε_1 і ε_2 – ступінь чорноти поверхні 1 та поверхні 2; $\varphi_{12} = H_{12}/F_1$ та $\varphi_{21} = H_{12}/F_2$ – коефіцієнти опромінення або кутові коефіцієнти випромінювання, що показують, яка частина випромінювання, що випускається одним тілом, падає на друге.

V. МЕТОДОЛОГІЯ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧІ

Достатньо складна геометрія контейнерів, відсутність чітко вираженої направленості течії рухомого середовища в будь-якому з напрямків робить недоцільним використання різних криволінійних систем координат. Тому доцільно проводити моделювання теплових процесів в ССВЯП у декартовій системі координат. Спрямуємо ось Oz догори, перпендикулярно поверхні землі, осі 0x, 0y спрямуємо паралельно поверхні землі таким чином, щоб вони знаходились у площинах симетрії корзини (рис. 2). У цьому випадку вектор прискорення вільного падіння можна записати у вигляді $\mathbf{g} = (0, 0, -g)$.

На рис. 2 цифрами позначені металевий корпус та направляючі труби (1), збірки (2), кришка корзини (3), гелій (4), зона оголовків збірок (5), зона палива (6), зона хвостовиків (7). На поверхнях розрахункової

області задавались наступні граничні умови:

– на поверхні П1 та П2 коефіцієнти тепловіддачі та температура охолоджуючого повітря, які були отримані на першому етапі дослідження [12];

– на поверхні П3 тепловий потік, який відповідає кількості тепла, що відводиться крізь нижню поверхню корзини у бетонний контейнер.

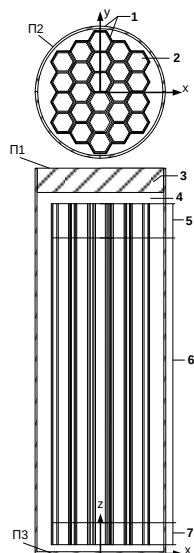
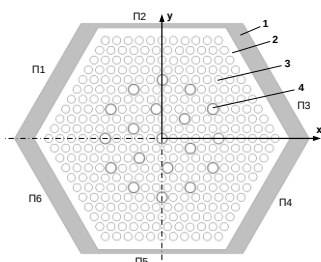


Рисунок 2. Розрахункова область

При проведенні досліджень відпрацьовані тепловиділяючі збірки розглядались як сукупність однорідних тіл (оголовок, зона палива, хвостовик) з еквівалентним значенням теплопровідності 1,04 Вт/(м·К). Металеві частини (корпус корзини та направляючі труби) мали теплопровідність 45,00 Вт/(м·К), багатощарова кришка БГК розглядалась як однорідне тіло з еквівалентною теплопровідністю 3,06 Вт/(м·К).

Розрахункова область для визначення теплового стану відпрацьованої паливної збірки в корзині зберігання представлено на рис. 3.



1 – направляюча труба, 2 – гелій, 3 – твель, 4 – стрижні вигоряючого поглиначя

Рисунок 3. Розрахункова область для обчислювання теплового стану відпрацьованої паливної збірки

В залежності від місця розташування збірки у корзині на поверхнях П1-П6 задаються граничні умови – коефіцієнти тепловіддачі, використовувалось

двовимірний розрахунковий область (рис. 3), в якій твель розглядались як суцільні тепловиділяючі елементи. Потужність тепловиділення кожного твеля задавалась як 3,2 Вт, зважаючи на те, що сумарна потужність тепловиділення однієї збірки при завантаженні у контейнер зберігання не повинна перевищувати 1 кВт.

Як зазначалось вище, складністю підходів, де використовуються спрощені суцільні тіла з еквівалентними теплофізичними властивостями, є саме визначення цих теплофізичних властивостей. Для задачі, що розглядалась, принциповим є значення еквівалентного коефіцієнту тепловіддачі твель.

Роботи по визначенню еквівалентного коефіцієнту теплопровідності твеля проводилися неодноразово вітчизняними та закордонними вченими [2, 16]. Отже, базуючись на представлений в літературі інформації, для твель було прийнято коефіцієнт теплопровідності 5,5 Вт/(м·К), для стрижнів вигоряючого поглиначя – 22 Вт/(м·К), для металу направляючих труб – 45 Вт/(м·К). Теплопровідність гелію була представлена поліноміальною залежністю від температури T:

$$\lambda = -5,0 \cdot 10^{-10} \cdot (T + 273,15)^3 + 6,0 \cdot 10^{-7} \cdot (T + 273,15)^2 + 1,0 \cdot 10^{-4} \cdot (T + 273,15) + 0,0771.$$

VI. РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКУ

Зважаючи на симетричність розміщення відпрацьованих тепловиділяючих збірок у корзині зберігання розглянемо лише ті паливні збірки, що потрапляють до чверті корзини як показано на рис. 4. Нумерація поверхонь направляючих труб для кожної зі збірок виконувалась у напрямку руху часової стрілки.

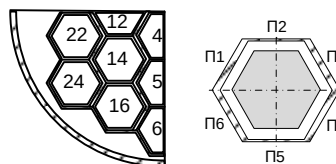


Рисунок 4. Номера збірок та поверхонь для визначення граничних умов

За результатами розрахунку були визначені також розподіли температур по кожній з поверхонь направляючої труби для кожної відпрацьованої паливної збірки (рис. 5). Найнижчі температури зафіксовані у зоні хвостовика, прогрів цієї частини направляючої труби для кожної із збірок майже однаковий, градієнт температур близько 50 градусів. Найвищі температури у зоні тепловиділення на відстані близько 3 м від низу направляючої труби. Найбільш нагрітою є поверхня П2 збірки №4, що розташована в центрі корзини, найменше нагрітою – поверхня П5 збірки №6. Для всіх направляючих труб кожної із збірок характерний ріст температур в зонах від хвостовика до оголовку і спад в зоні оголовка, де тепловиділення не відбувається. Такий характер охолодження збірок обумовлює

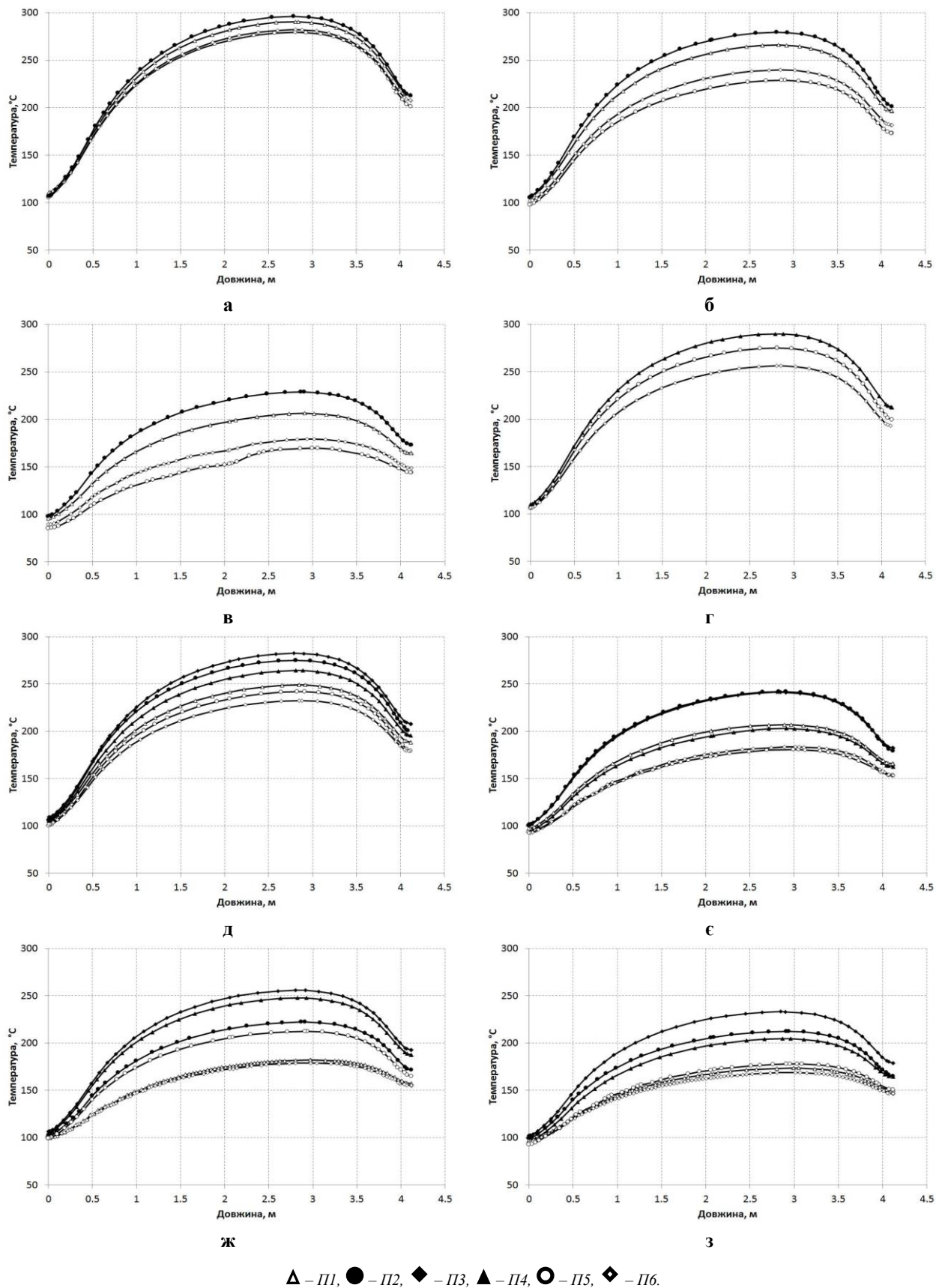


Рисунок 5. Температура по поверхні направляющих труб: а – збірка 4, б – збірка 5, в – збірка 6, г – збірка 12, д – збірка 14, е – збірка 16; ж – збірка 22; з – збірка 24;

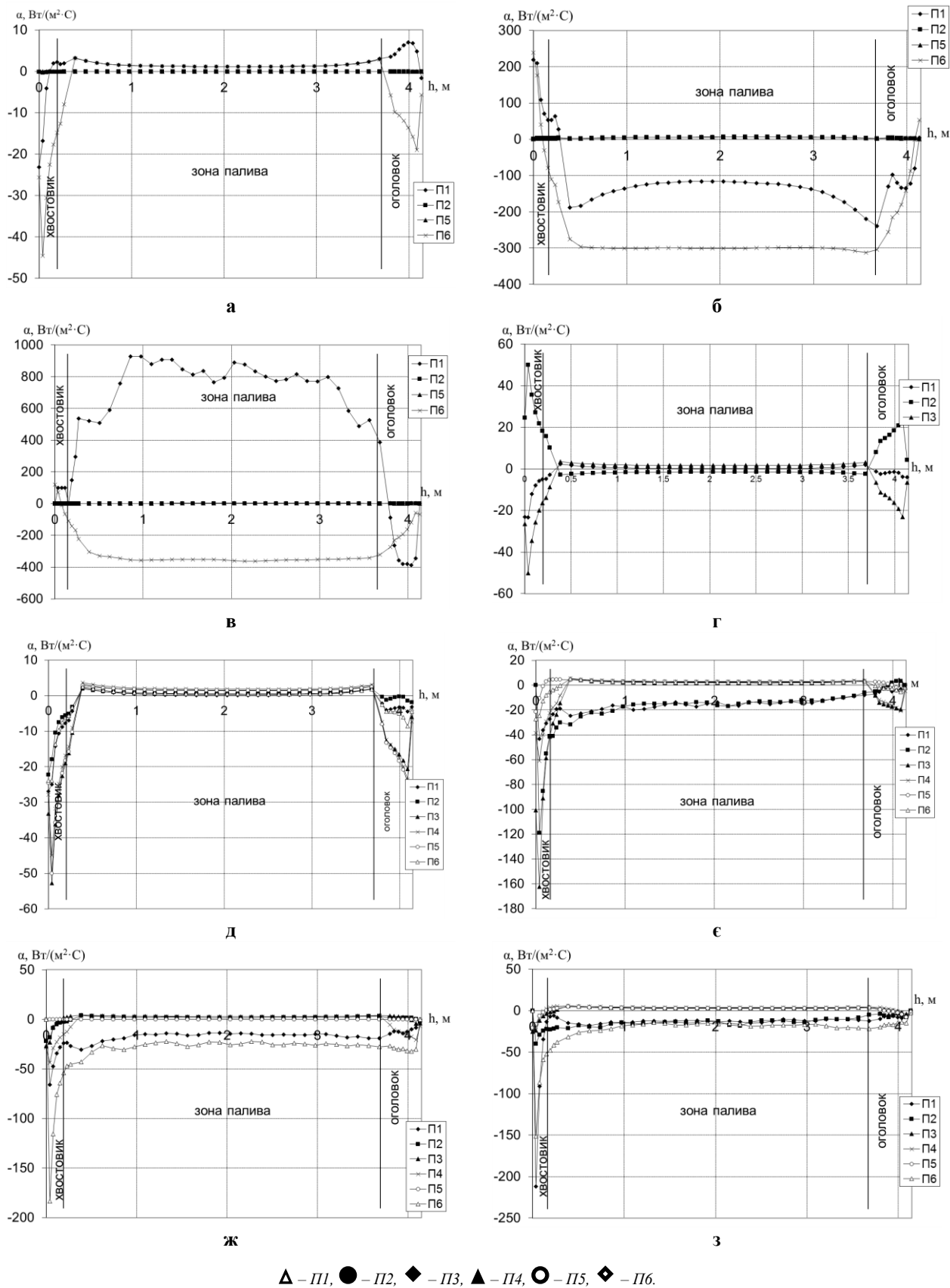


Рисунок 6. Розподіл КТВ по поверхнях, що оточують збірку: а – збірка 4, б – збірка 5, в – збірка 6, г – збірка 12, д – збірка 14, є – збірка 16; ж – збірка 22; з – збірка 24

розподіл коефіцієнтів тепловіддачі на поверхнях направляючих труб.

На рис. 6, наведені розподіли КТВ по обмежувачим поверхням для кожної зі збірок. Від'ємні чи додатні значення коефіцієнтів тепловіддачі вказують на напрямки теплового потоку: від'ємні – тепловий потік направлений назовні розрахункової області, додатні – усередину.

Для усіх поверхонь направляючих труб характерними є сплески значень КТВ у зонах хвостовика та оголовка. Такий характер розподілу КТВ обумовлений відсутністю рівномірного нагріву зі сторони ВТВЗ, поверхні яких нагріваються завдяки теплопередачі з середньої частини направляючої труби або завдяки променевому теплообміну.

Як видно з рис.6 коефіцієнти тепловіддачі на поверхнях, що розділяють збірки і не межують з широкими чи вузькими каналами, мають найнижчі значення, що обумовлено слабким рухом гелію у середовищі біля збірки, яка має близьку температуру, а також тим, що поверхня розташована поруч з іншою тепловіддаючою збіркою. Більш інтенсивна тепловіддача відбувається на поверхнях, розташованих ближче до краю корзини, тим самим обумовлюючи вищий рівень КТВ.

Використовуючи результати розрахунку, коли збірки були представлені як суцільні тіла, були визначені їх детальні температурні поля. На зовнішніх поверхнях направляючих труб були задані граничні умови виходячи з результатів обчислення теплового стану відпрацьованих збірок, що були отримані на попередньому етапі роботи. Граничні умови визначалися у горизонтальному перерізі, що розташований на рівні максимальних температур збірки. Це дозволило отримати найбільш важливу з точки зору розробки теплових критеріїв безпеки інформацію про температури у твелах кожної зі збірок. Температурні поля твелів, направляючих труб та гелію, що заповнює простір між твелями та направляючими трубами наведено на рис. 7.

З рисунку видно, що найбільші температури спостерігаються у збірці, що розташована найближче до центру корзини – збірці № 3. Найнижчі температури – у збірці № 18, що розташована найближче до стінки корзини та охолоджується гелієм у вузькому та широкому каналах.

Застосований підхід дозволив визначити максимальні температури у кожній зі збірок під час їх сухого зберігання. Результати представлені у вигляді гістограми, що наведена на рис. 8. Такі дані добре кореспондуються з даними по максимальним температурам у корзині зберігання, що були отримані на попередніх етапах роботи, коли корзина зберігання розглядалась як суцільне тіло та при моделюванні корзини з ВТВЗ, коли збірки розглядались як суцільні тіла з еквівалентними теплофізичними властивостями [11].

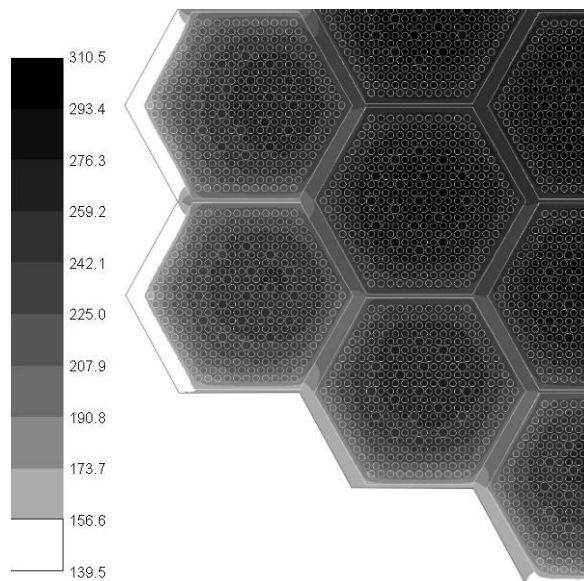


Рисунок 7. Температурне поле в горизонтальному перерізі корзини зберігання відпрацьованого ядерного палива на рівні максимальних температур при температурі атмосферного повітря 40 °С

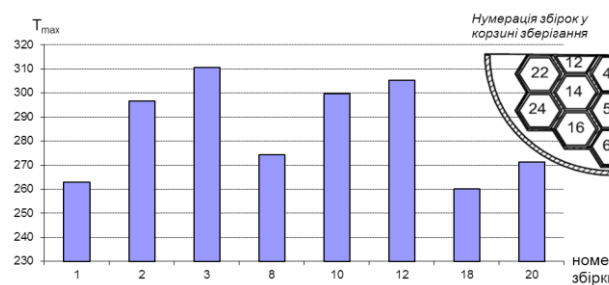


Рисунок 8. Максимальні температури збірок у корзині зберігання

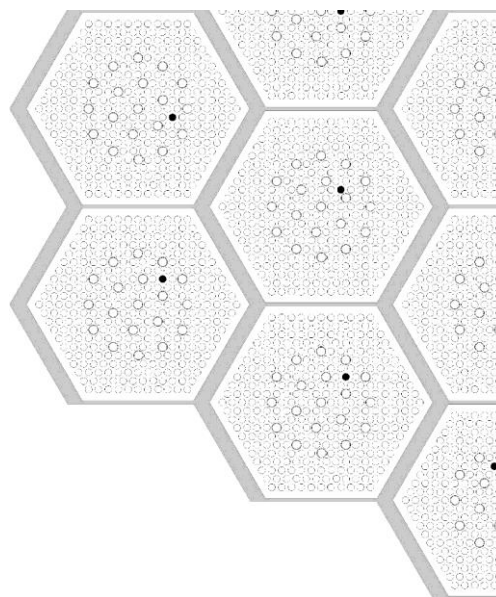


Рисунок 9. Місцезаповнення твелів з максимальною температурою

Отримані дані важливі, перш за все, для розробки теплових критеріїв безпеки при сухому зберіганні ВЯП. Для цього необхідно мати інформацію про місце розташування твेलів з максимальною температурою. На рис. 9 чорним позначені твели в яких спостерігаються найбільші з усіх твेलів збірки температури.

З рис. 9 видно, що найбільш термонапруженими є твели, що розташовані у центральній частині збірки, де, вочевидь, рівень променевого теплового потоку з поверхні твेलів значно нижче ніж у твेलів, що розташовані на периферії збірки, а конвективний теплообмін грає незначну роль у їх охолодженні. Однак, слід зауважити, що твели з найбільшими температурами розташовані не у центрі збірки, а ближче до тієї стінки направляючої труби, яка розташована ближче до центру корзини та межує з більш гарячою збіркою.

ВІСНОВКИ

В роботі застосовано ітеративний підхід щодо визначення теплового стану відпрацьованого ядерного палива при його сухому зберіганні. Визначено температури паливних збірок та зміна інтенсивності охолодження кожної з них. Найбільші температури досягаються в центральній їх частині, що обумовлює також відповідний нагрів направляючих труб. Місця розташування найбільш гарячих твेलів також обумовлені умовами теплообміну в корзині зберігання – найбільш гарячі твели розташовані у збірці у напрямку до центру корзини та ближче до найбільш нагрітих стінок направляючої труби.

Результати проведених досліджень дозволили підтвердити теплову безпеку експлуатації вентильованих контейнерів зберігання ВЯП у сухому сховищі Запорізької АЕС, яке розраховано на зберігання відпрацьованих тепловиділяючих збірок реакторів ВВЕР-1000, що накопичаться за весь період експлуатації станції. Отримані дані можуть бути використані також для розробки нових критеріїв безпеки сухого зберігання відпрацьованого ядерного палива, розробки та впровадження конструктивних та технологічних рішень стосовно створення або модернізації обладнання зберігання відпрацьованого ядерного палива Запорізької АЕС.

Роботи виконані у рамках цільової комплексної програми наукових досліджень НАН України «Наукове забезпечення розвитку ядерно-енергетичного комплексу та перспективних ядерних технологій» відповідно до договору К-5-40/2018 та за часткової підтримки Міжнародної агенції з атомної енергії (МАГАТЕ) відповідно до договору CRP-20605.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Yamakawa, H. Demonstration test for a shipping cask transporting high burn-up spent fuels – thermal test and analyses / H.Yamakawa, M.Wataru, Y.Kouno, T.Saegusa // The 12th International Conference on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials, May 10-15, 1998, Paris, France – P. 659-666.
- [2] Evaluation of the use of Homogenized Fuel Assemblies in the Thermal Analysis of Spent Fuel Storage Casks / G.R.Thomas, R.W.Carlson – Lawrence Livermore National Laboratory, 1999 – 45 P.
- [3] Murakami, J. Li, H. Peak Cladding Temperature in a Spent Fuel Storage or Transportation Cask / J. Li, H. Murakami, Y. Liu, P.E.A. Gomez, M.Gudipati, M.Greiner // The 12th International Conference on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials, October 21-26, 2007, Miami, Florida, USA – 1-11 P.
- [4] Wataru, M. Thermal Hydraulic Analysis Compared with Tests of Full-scale Concrete Casks / H.Takeda, K.Shirai, T. Saegusa // Nuclear Engineering and Design. – 2008. – No. 238. – 1213-1219 pp.
- [5] Suffield, S.R. Thermal Modeling of NUHOMS HSM-15 and HSM-1 Storage Modules at Calvert Cliffs Nuclear Power Station ISFSI / J.M. Cuta, J.A. Fort, B.A. Collins, H.E. Adkins, E.R. Siciliano // Pacific Northwest National Laboratory – 2012. – 102 P.
- [6] Preliminary Thermal Modeling of HI-STORM 100 S-218 Version B Storage Modules at Hope Creek Nuclear Power Station ISFSI / U.S. Department of Energy – 2013. – 59 P.
- [7] Spent Nuclear Fuel Effective Thermal Conductivity Report – CRWMS M&O, Nevada Site – 1996. – 204 p.
- [8] Alyokhina, S. Equivalent thermal conductivity of the storage basket with spent nuclear fuel of VVER-1000 reactors / S. Alyokhina, A. Kostikov // Kerntechnik. – 2014. – Vol. 79, No. 6. – P. 484-487, DOI: 10.3139/124.110443
- [9] Костиков, А. О. Обратные сопряженные задачи теплопереноса / А.О.Костиков, Ю.М.Мацевитый // Проблемы машиностроения. – 2007. – Т. 10. – № 5. – С.19-26.
- [10] Ivankov, V. Calculation of cfd-thermal models of oil-cooled transformer equipment / V. Ivankov, A. Bасова // Electrical Engineering And Power Engineering. – 2016. – №2. – P.19-32, DOI: 10.15588/1607-6761-2016-2-3
- [11] Walavalkar, A. Y. 3-D CFD Simulation of a ventilated concrete cask used for spent nuclear fuel storage / A. Y. Walavalkar, D. G. Schowalter // Proceedings of WM'04 Conference, February 29 – March 4, 2004, Tucson. P. 75-77
- [12] Alyokhina, S. Simulation of thermal state of containers with spent nuclear fuel: multistage approach / S. Alyokhina, V. Goloshchapov, A. Kostikov, Yu. Matsevity // International Journal of Energy Research. – 2015. – V. 39. – №. 14. – P. 1917-1924, DOI: 10.1002/er.3387
- [13] Рудычев, В. Г. Безопасность сухого хранения отработавшего ядерного топлива / В. Г. Рудычев, С. В. Алёхина, В. Н. Голошапов и др. / Под общ. ред. акад. НАН Украины Ю. М. Мацевитого, чл.-

- кор. НАН України І. І. Залюбовського. – Х.: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2013. – 200 с.
- [14] Bergel'son, B. R. Residual energy release and actinide and fission product radiotoxicities during long-term storage of high burnup spent VVER fuel / B. R. Bergel'son, A. S. Gerasimov, T. S. Zaritskaya, G. V. Tikhomirov // Atomic Energy. – 2005. – V. 102. – № 5 – pp 364-368, DOI: 10.1007/s10512-007-0057-4
- [15] Отчет по анализу безопасности сухого хранилища отработавшего ядерного топлива Запорожской АЭС. Версия 3.01.1 / ОП «Запорожская АЭС» – Инв. № 1526(3). – Энергодар, 2008 – 624 с.
- [16] Чиркин, В. С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники / В. С. Чиркин. М.: Атомиздат, 1967. – 474 с.

Стаття надійшла до редакції 21.06.2018

УСЛОВИЯ ТЕПЛООБМЕНА В КОНТЕЙНЕРЕ СУХОГО ХРАНЕНИЯ ОТРАБОТАННОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕАКТОРОВ

АЛЁХИНА С. В.

канд. техн. наук, старший научный сотрудник, старший научный сотрудник Института проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины, доцент кафедры теплофизики, молекулярной физики и энергоэффективности Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина, Харьков, Украина, e-mail: alyokhina@karazin.ua

Цель работы. Обоснование безопасности эксплуатации сухого хранилища отработавшего ядерного топлива энергетических реакторов ВВЭР-1000 Запорожской АЭС путем проведения численных исследований тепловых процессов в контейнере сухого хранения.

Методы исследования. Математическое моделирование, численное решение прямых сопряженных и обратных задач теплообмена.

Полученные результаты. Получены распределение температур и коэффициентов теплоотдачи на поверхностях направляющих труб в корзине хранения отработавших топливных сборок энергетических реакторов ВВЭР-1000 Запорожской АЭС. С использованием итеративной методики моделирования тепловых процессов получены детальные поля температур отработавших топливных сборок в корзине хранения. Определены максимальные температуры в каждой из отработавших топливныхборок и идентифицированы места расположения наиболее горячих твэлов.

Научная новизна. Впервые с использованием итеративной методики моделирования тепловых процессов при сухом хранении отработавшего ядерного топлива получена детальная информация о тепловых процессах в середине корзины с отработавшим топливом в нормальных условиях эксплуатации.

Практическая ценность. Подтверждена безопасность хранения отработавшего ядерного топлива реакторов ВВЭР-1000 в сухом хранилище Запорожской АЭС. Полученные результаты целесообразны для использования при создании научно-методологических основ безопасности сухого хранения отработавшего ядерного топлива энергетических реакторов, а также полезны при разработке и внедрении конструктивных и технологических решений относительно создания или модернизации оборудования хранения отработавшего ядерного топлива энергетических реакторов.

Ключевые слова: атомная электроэнергетика; отработавшее ядерное топливо; вентилируемый контейнер сухого хранения; отработавшие топливные сборки; тепловые процессы; сопряженные задачи теплообмена; коэффициент теплоотдачи

HEAT EXCHANGE CONDITIONS IN THE DRY STORAGE CONTAINER FOR SPENT NUCLEAR FUEL OF POWER REACTORS

ALYOKHINA S.

PhD, Senior scientific researcher, Senior scientific researcher in A. Podgorny Institute of Mechanical Engineering Problems of the National Academy of Sciences of Ukraine, associate professor of the department of thermal physics, molecular physics and energy efficiency of V.N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine, e-mail: alyokhina@karazin.ua;

Purpose. The safety substantiation of the spent nuclear fuel of power reactors WVER-1000 of Zaporizhska NPP dry storage facility operation by carrying out of numerical study of the thermal processes inside dry storage container.

Methodology. Mathematical modeling, numerical solving of the direct and inverse heat transfer problems.

Findings. The distribution of temperatures and heat transfer coefficients on the surfaces of guide tubes inside storage cask with spent fuel assemblies of power reactors WVER-1000 of Zaporizhska NPP are obtained. With usage

of the iterative methodology of thermal processes modeling the detailed temperature fields of spent fuel assemblies inside storage cask are obtained. The maximum temperatures in each spent fuel assembly are defined and the places of the most heated fuel rods are identified.

Originality. For the first time with usage of iterative methodology of thermal processes modeling at the dry spent nuclear fuel storage the detailed information about thermal processes inside storage cask with spent fuel under normal conditions of operations is obtained.

Practical value. The safety of spent nuclear fuel of reactors WWER-1000 in the dry storage facility of Zaporizhska NPP is confirmed. The obtained results are reasonable for usage at development of scientific-methodological basis of safety of the dry storage of spent nuclear fuel of power reactors, and also useful at development and implementation of designs of creation and modernization of equipment for spent nuclear fuel.

Keywords: nuclear energy industry; spent nuclear fuel; ventilated dry storage container; spent fuel assemblies; thermal processes; conjugate heat transfer problems; heat transfer coefficient

REFERENCES

- [1] Yamakawa, H., Wataru, M., Kouno, Y., Saegusa, T. (1998). Demonstration test for a shipping cask transporting high burn-up spent fuels – thermal test and analyses. *The 12th International Conference on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials*, 659-666.
- [2] G.R.Thomas, R.W.Carson (1999). Evaluation of the use of Homogenized Fuel Assemblies in the Thermal Analysis of Spent Fuel Storage Casks. Lawrence Livermore National Laboratory, 45.
- [3] Li, J., Murakami, H., Liu, Y., Gomez, P.E.A., Gudipati, M., Greiner, M. (2007). Peak Cladding Temperature in a Spent Fuel Storage or Transportation Cask. *The 12th International Conference on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials*, 1-11.
- [4] Wataru, M., Takeda, H., Shirai, K., Saegusa, T. (2008) Thermal Hydraulic Analysis Compared with Tests of Full-scale Concrete Casks. *Nuclear Engineering and Design*, 238, 1213-1219
- [5] Suffield, S.R., Cuta, J.M., Fort, J.A., Collins, B.A., Adkins, H.E., Siciliano, E.R. (2012). Thermal Modeling of NUHOMS HSM-15 and HSM-1 Storage Modules at Calvert Cliffs Nuclear Power Station ISFSI. Pacific Northwest National Laboratory, 102.
- [6] (2018). Preliminary Thermal Modeling of HISTORM 100 S-218 Version B Storage Modules at Hope Creek Nuclear Power Station ISFSI. U.S. Department of Energy, 59.
- [7] (1996). Spent Nuclear Fuel Effective Thermal Conductivity Report. CRWMS M&O, Nevada Site, 204.
- [8] Alyokhina, S., Kostikov, A. (2014) Equivalent thermal conductivity of the storage basket with spent nuclear fuel of VVER-1000 reactors. *Kerntechnik*, 79, 6, 484-487. DOI: 10.3139/124.110443
- [9] Kostikov, A. O., Matsevit, Yu.M. (2007) Obratnye sopryazhennye zadachi teploperenosu. *Problemy mashinostroeniya*. 10, 5, 19-26.
- [10] Ivankov, V., Basova, A. (2016). Calculation of cfd-thermal models of oil-cooled transformer equipment. *Electrical Engineering And Power Engineering*, 2, 19-32. DOI: 10.15588/1607-6761-2016-2-3
- [11] Walavalkar, A. Y., Schowalter, D. G. (2004). 3-D CFD Simulation of a ventilated concrete cask used for spent nuclear fuel storage. *Proceedings of WM'04 Conference*, 75-77
- [12] Alyokhina, S., Goloshchapov, V., Kostikov, A., Matsevit, Yu. (2015). Simulation of thermal state of containers with spent nuclear fuel: multistage approach. *International Journal of Energy Research*, 39, 14, 1917–1924. DOI: 10.1002/er.3387
- [13] Rudychev, V. G., Alyokhina, S. V., Goloshchapov, V. N. (2013). Bezopasnost suhogo hranenija otrabotavshego jadernogo topliva. Kh.: HNU imeni V. N. Karazina, 200. (in Russian)
- [14] Bergel'son, B. R., Gerasimov, A. S., Zaritskaya, T. S., Tikhomirov, G. V. (2005). Residual energy release and actinide and fission product radiotoxicities during long-term storage of high burnup spent VVER fuel. *Atomic Energy*, 102, 5, 364-368. DOI: 10.1007/s10512-007-0057-4
- [15] (2008). Otchet po analizu bezopasnosti suhogo hranilischa otrabotavshego jadernogo topliva Zaporozhskoj AES. Versija 3.03.1. OP «Zaporozhskaja AES», Energodar, 624. (in Russian)
- [16] Chirkin V. S. (1967). Teplofizicheskie svoystva materialov jadernoj tehniki. M: Atomizdat, 474

ANALYSIS OF ELECTROTECHNICAL PROPERTIES OF INNOVATIVE HIGH-TEMPERATURE WIRES FOR OVERHEAD POWER TRANSMISSION LINES

LUSHCHIN S.P. Cand. of Phys.-Mathem. Sciences, associate professor, Department of Physics, Zaporizhzhya National Technical University, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: luschin@zntu.edu.ua;

BOROVSKIY A.V. Masters of the Department of Electrical Machines and Apparatuses of the Zaporizhzhya National Technical University, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: aayy6491@gmail.com;

BOROVSKIY M.V. Masters of the Department of Electrical Machines and Apparatuses of the Zaporizhzhya National Technical University, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: kalbkab96@gmail.com;

Purpose. Determination of the capacity of wires of overhead power transmission lines based on innovative materials without changing the currently used structures, as well as the possibility of increasing the voltage class of overhead transmission lines when using wires based on aluminum-zirconium materials.

Methodology. Analytical method for determining the throughput capacity of overhead power transmission lines. Comparative analysis of electrical characteristics of wires of overhead power transmission lines.

Findings. The possibility of increasing the capacity of overhead power transmission lines while maintaining the wire cross-section, using an innovative material based on an aluminum-zirconium alloy, has been proved. The reduction of the weight of the wire based on innovative materials is justified, while maintaining the current throughput. The advantages and disadvantages of European wire structures for overhead power transmission lines are revealed using innovative material based on an aluminum-zirconium alloy. The optimal design of wires based on the innovative material of the aluminum-zirconium alloy for overhead transmission lines, permissible for use on the territory of Ukraine, has been determined.

Originality. The expediency of using the traditional designs of the wires of overhead power transmission lines has been proved, in the case of using innovative material. The possibility of increasing the voltage class of overhead power transmission lines using wires based on aluminum-zirconium materials has been substantiated.

Practical value. The results are obtained regarding the electrical resistance of overhead power transmission lines to peak loads, taking into account the low costs of modernization with the use of an innovative material based on an alloy of aluminum and zirconium. The use of innovative material creates conditions for increasing the voltage class of overhead power transmission lines, which allows increasing the transmitted power to the consumer. The use of materials based on aluminum-zirconium alloys makes it possible to carry out measures for the reconstruction of electric supply networks without replacement of supports and additional work on land allocation, as in the case of reconstruction without increasing the voltage line class of power lines, and in case of increasing the voltage class.

Keywords: overhead power transmission line; aluminum alloyed with zirconium; throughput; brands of wires.

I. INTRODUCTION

High-voltage overhead transmission lines in the coming decades will continue to determine the development of both the world and domestic electric power industry.

The current state of Ukraine's high-voltage transmission lines mirrors the economic situation in the country. In order to overcome the problems in the current economic situation, many ideas have been proposed through energy saving for power supply system's [1] – [2].

The degree of physical aging of the existing fleet of high-voltage overhead electric lines depends on the commissioning of new facilities. Simple mathematical calculations show that if you commission new equipment to increase the power of the transmission systems by half every six years (8% of new equipment per year), then 8% of the network equipment is older than 30 years. If the

renewal of the network park is 4% per year, then the share of equipment older than 30 years will be 29%. Taking into account the requirements of GOST 839-80 [3] on the continuity of the performance of wires based on aluminum wires, the lack of renewal of capacities for 50 years may begin to be critical for the entire electric system of Ukraine.

Already, we can say that the solution of this problem through an extensive way is almost hopeless. To solve this technical problem, it seems necessary to differentiate the task of updating the fleet of electricity transmission capacities. It is technically feasible and affordable to conduct a survey of the residual load-bearing capacity of the masts of overhead power transmission lines (OPTL) in order to decide whether to perform routine maintenance instead of completely replacing them. The basis for this is the emergence of the possibility of using innovative designs of lightweight wires based on aluminum alloys

doped with zirconium [4] – [8].

There are two tasks: the renewal of existing overhead lines in connection with their wear and tear and the increase in capacity through the commissioning of new transmission lines. The use of aluminum alloys allows you to solve these two tasks simultaneously, using existing masts of transmission lines. As a rule, the cross section of the power line wires is read out taking into account peak loads. At the same time, these loads are only a few hours a day, the rest of the time the wire cross-section is used inefficiently. The solution to this problem is to increase the thermal stability of the wire, allowing to increase the transmitted power during peak loads due to a higher permissible operating temperature.

One of the directions of modernization of the infrastructure of the electric power networks of the overhead line is the use of new thermally stable materials that must combine high electrical conductivity and sufficient strength, which persists after heating up to 240 ° C. Since at these temperatures the crystallographic structure of undoped aluminum is highly disordered, it is not possible to create heat-resistant wires based on aluminum grades of the type A5E and A7E. The solution is the creation of low-alloyed aluminum alloys with the addition of zirconium [9] – [10].

The indicators of quality, reliability and efficient operation of the united energy system of Ukraine directly depend on the functioning and condition of overhead transmission lines. According to data for 2017 in Ukraine, the length of the 0.4 kV transmission line amounted to 449,832 km, and the voltage of 6-10 kV to 332,568 km, in addition, there is a tendency for an annual increase in the length of the line. There is a need to increase the efficiency of power systems, which is achieved by increasing the nominal network voltage [9].

The task can be solved by choosing a new and effective direction in the development of power transmission systems, which is based on scientifically based technical solutions using modern methods and technologies.

The directions and ways of solving this task in the context of reforming the relations of property in the energy sector are determined by the technical policy of the Ministry of Energy and Coal Industry of Ukraine, approved by the protocol of the scientific and technical council of September 14, 2016, as a set of tools, which are obliged to implement the provisions of the Law of Ukraine of 16.10.1997 №575 / 97 - BP "About electric power engineering" [11]. This law provides for the creation by the state of conditions for the development and enhancement of the technical level of the electric power industry.

The papers [12] – [13] show the actual and projected volumes of electricity consumption in Ukraine by groups of consumers for the period up to 2025 (Table 1).

Table 1. Actual and projected electricity consumption in Ukraine and by consumer groups up to 2025

Consumer groups	Fact. power consum. 2016 (Mln kWh)	Fact. power consum. 2018 (Mln kWh)	Fact. power consum. 2020 (Mln kWh)	Fact. power consum. 2022 (Mln kWh)	Fact. power consum. 2025 (Mln kWh)
Electricity supply to consumers	101868	115539	125938	32235	164394
(+) Increase / (-) Reduction from the previous year	-1,6	0,7	0,9	0,5	1,2
Industry	41979	47613	51898	54493	67746
	including the main branches:				
Fuel	4031,8	4113,2	4208,3	4280,1	4457,9
Metallurgical	27978	27116	4208,3	4280,1	27439
Chemical and petrochemical	1282	1454	1584	1664	2068
Machine-building	2853	3235	3527	3703	4604
Building materials	2048,8	2047,5	2055,7	2022,8	2075,8
Food and processing	4078,4	4315,9	4428,8	4477,6	4663,6
Agricultural	2298	4315,9	4428,8	4477,6	4663,6
Transport	6684,4	6535,0	6561,1	16228	6461,1
Building	749,1	766,8	773,7	767,5	793,9
Population	31552	35787	39008	40958	50919

The process is replaced by the morally and physically worn-out equipment at the present time is rather slow. The volume of such equipment in Ukraine is by various estimates from 40 to 80%. At present, this process has

slowed down even more. As a result, the loss of electricity is growing, besides, given the current situation in Ukraine, the question arises of the prospects for the development of an overhead transmission line. This is due to increased energy consumption.

However, the increase in demand for electricity in conditions of difficulties with land allocation determines the need to increase the capacity of existing lines and reduce power losses.

II. ANALYSIS OF LAST RESEARCHES

In the publication of D. Zotov [5] and V.N. Kuryanova [6] conducted a comparison of air power transmission wires from innovative material in the constructions shown in Fig. 1.

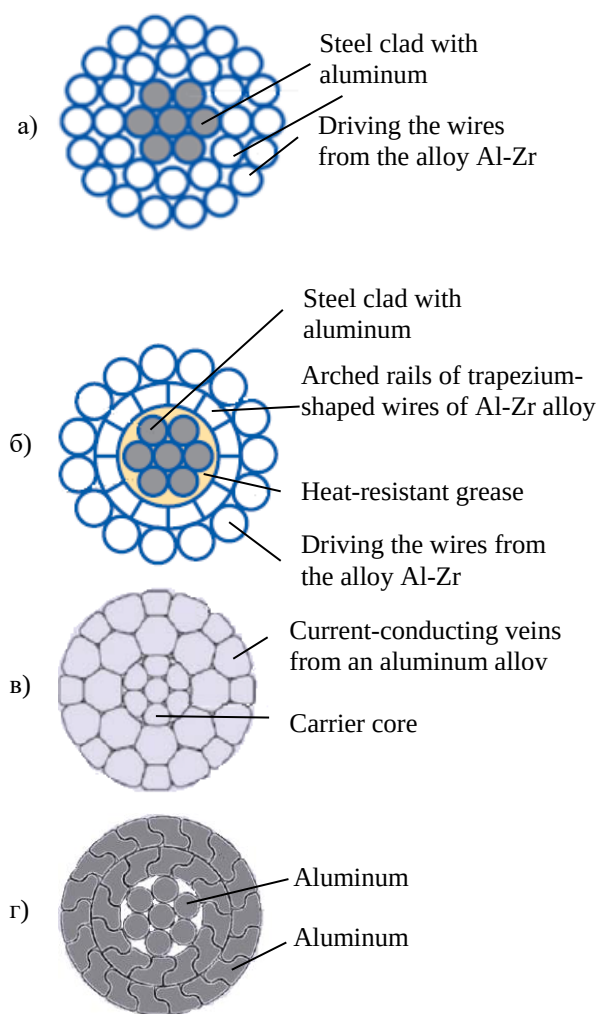


Figure 1. Construction of wires of type a) ASPT; b) ASPTs; c) ASVT; d) AERO-Z.

Electrotechnical aluminum and aluminum-alloy alloys, doped with zirconium, have a significant difference in properties. The resistivity of aluminum zirconium alloys is somewhat higher than that of aluminum. This is also fixed in the norms for wires [3], [14], [15]. In the

works [4], [5], [8], [16], researchers have been informed about the possibility of reducing the resistance of the wires of OPTL on the basis of Al-Zr alloys to the wires of the brand AC by using new design solutions. However, all considered innovative designs of OPTL wires are not based on existing national regulatory documents in Ukraine. In this regard, their application in Ukraine is extremely difficult. Therefore, comparative studies of the properties of the wires of the overhead lines made on the basis of aluminum and alumina-conium alloys in the context of the current regulatory documents for the regulatory design of the OPTL wires will enable us to compare the properties of the materials under study under the same conditions of design solutions and also to substantiate the technical feasibility the use of OPTL wires in the current legislation.

Properties of heat-resistant wires for overhead lines on the basis of aluminum alloys doped with zirconium were studied earlier by a wide range of researchers [4] – [8]. They compared these innovative products with traditional wires based on electrical aluminum. However, in all of these publications, aluminum and high-temperature wires were compared in various versions of the design. As it seems to us, the design has a significant effect on the technical properties of the wires. In [12], the wires of new design types were compared on the basis of innovative materials in relation to the properties of wires in a traditional design based on traditional materials. Data given by these authors do not allow us to evaluate separately the effect of using a new material (AlZr) on the properties of products. For a more complete evaluation of the actual new material in this article, we consider the properties of new materials in the construction of wires in accordance with GOST 839-80 [3] and JEC 3406: 1995.

III. FORMULATION OF THE WORK PURPOSE

The purpose of this paper is to determine, on the basis of available data on the properties of aluminum and aluminum-zirconium materials, the range of technical applicability of OPTL wires based on innovative materials for overhead transmission lines without changing the currently used designs, as well as the justification of the possibility of upgrading the voltage rating of overhead power lines using aluminum-zirconium-based wires.

IV. EXPOUNDING THE MAIN MATERIAL AND RESULTS ANALYSIS

The basis for this was the construction of a wire of the AC type in accordance with GOST 839-80 [3]. The results of calculations for wires of high-voltage lines of the same section, obtained on the basis of the initial data and the above-mentioned standards, are shown in Fig. 2. A comparison of these data shows that the throughput for wires based on wires from a heat-resistant alloy of the AT brand is significantly increased (from 1.7 to 2.3 times, depending on the selected wire grade) compared to the AC wire.

Based on the above material, it can be seen that innova-

tive heat-resistant wires of various designs allow to significantly increasing the transmission capacity of power lines due to higher permissible current loads.

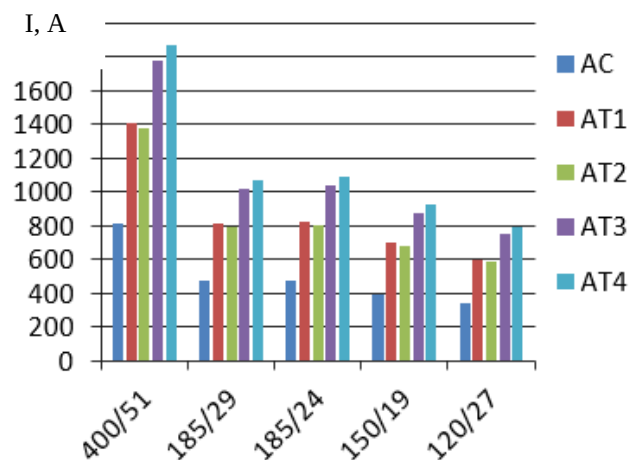


Figure 2. Limiting currents for wires of the brand AC on the basis of different materials.

The ordinate shows the current, A; the wire cross-section is indicated along the abscissa, the first value corresponds to the aluminum part, and the second corresponds to the steel part of the wire, mm²; AC – when using conventional aluminum, AT1, AT2, AT3, AT4 – using aluminum-zirconium instead of pure aluminum.

When replacing an aluminum wire in wires of the AC type with an aluminum zirconium wire, it also increases the capacity of the line, which can lead to a favorable economic effect.

Reducing the section of the wire, while maintaining the current load, will lead to a reduction in the amount of material expended.

The preservation of the wire cross section with the use of innovative material makes it possible to increase the load of the overhead line. However, this method of reconstructing OPTL is more problematic, since it is necessary to take into account the distance between the wires when the voltage of the overhead line is increased, which is limited by the structure of the existing support.

Proceeding from this, the calculation and selection of the cross-section of the OPTL wires based on the AT wires was made, the admissible current for which is compared with the permissible current of the wires of the AC of the nominal section. The obtained data are presented in Table. 2.

Analyzing the data of various manufacturers on the significant increase in the cost of heat-resistant wires [5], compared to wires based on electrical aluminum and technological features of manufacturing heat-resistant wires [9], [10], it can be noted that technology manufacturing of heat-resistant wires almost completely coincides with the technology of aluminum wires. According to the research of the above-mentioned authors, the same equipment is used. There are two differences. The first is

the introduction of a zirconium ligature into an aluminum melt. The second is a long-term (no less than 10-20 hours) heat treatment (up to 450 °C). Given the small amounts of zirconium introduced (0.35 ... 0.45 mass %), doping with zirconium can't give a multiple increase in cost. It seems that the most significant contribution to the cost price is made by thermal processing. According to the data of the only manufacturer of heat-resistant wires on the territory of Ukraine LLC Krok-GT (Zaporozhye), the duration of heat treatment can be substantially reduced by complex alloying of the aluminum zirconium melt. The complex doping increases the rate of decomposition of the solid solution of zirconium in aluminum to the Al₃Zr phase and, thus, the heat treatment time is shortened and its conditions are facilitated.

We estimate the transmission capacity of the transmission line as a function of the increase in voltage. Power, which is transmitted by the network, is determined by the formula:

$$S = \sqrt{3}U_n JF, \quad (1)$$

where S is the transmission power, U_n is the nominal line voltage, J is the permissible current density, and F is the cross-sectional area of the wire.

Table 2. Comparison of technical characteristics of wires based on aluminum wires and wires of AT grades under the condition of the same current-leading capacity.

Characteristic	AC 400/51	AC 185/29 based on AT1	AC 185/24 based on AT2	AC 150/19 based on AT3	AC 120/27 based on AT4
Diameter, mm	27,5	18,8	18,9	16,8	15,4
Section, mm ²	445,1	210	211,2	166,8	140,6
Resistance, Ohm / km	0,073 3	0,159 1	0,15 4	0,204 6	0,25 31
Breaking force, kN	120	62	58	46	49
Weight without lubrication, kg	1490	728	705	554	528

Let us consider the case of a double increase in the voltage in the transmission line, i.e. U_{2n} = 2U_n. The permissible current density in this case does not change, nor does the wire cross-sectional area. Then:

$$\frac{S_n}{S_{2n}} = \frac{\sqrt{3}U_n JF}{\sqrt{3}U_{2n} JF} = 2. \quad (2)$$

Thus, the increase in transmission capacity is directly proportional to the increase in voltage in the transmission line.

We estimate the voltage drop in the line of electroreduction at a double increase in the voltage in the line by the formula:

$$\Delta U = \frac{(PR + QX)}{U^2}, \quad (3)$$

where P is the active power of the line, R is the line resistance, Q is the reactive line power, and X is the reactance of the line.

With the same load (transmitted power), with a twofold increase in voltage across the line, we will have:

$$\frac{\Delta U_n}{\Delta U_{2n}} = \frac{U_n^2}{U_{2n}^2} = \frac{1}{4}. \quad (4)$$

Consequently, a double increase in the voltage on the line leads to a fourfold decrease in the voltage drop in the line.

The loss of power in the line can be represented as:

$$\Delta P = 3I^2 R. \quad (5)$$

With the same load, doubling the voltage in the line will result in:

$$\frac{\Delta P_n}{\Delta P_{2n}} = \frac{\frac{S_n^2}{U_n^2} R}{\frac{S_{2n}^2}{U_{2n}^2} R} = \frac{1}{4}. \quad (6)$$

Consequently, the power losses in the line are also reduced by a factor of four with a double increase in line voltage.

These considerations are confirmed by the data of presented in Table. 3.

However, based on Ohm's law, increasing the voltage in the power line leads to an increase in the amperage. Consequently, the possibility of increasing the voltage and transmitted power is limited by the value of the permissible current load. The foregoing allows us to recommend the use of aluminum zirconium materials for the production of wires for overhead lines in order to carry out a set of measures to reduce losses in overhead lines and increase transmission capacity.

Thus, based on the data obtained, it can be concluded that the use of OPTL wires based on aluminum zirconium wires is possible in two versions: firstly, the recon-

struction of the transmission line, based on the reduction in the mass of innovative wires, but the invariance of the transmitted power, and the second option - a multiple increase in the transmitted power without changing the supports.

Table 3. Relative power losses

Section, mm ²	Loss of electrical energy in relation to the amount of electricity that has been supplied to the grid, %		
	6 kV	10 kV	20 kV
35	3,98	1,47	0,36
50	3,05	1,09	0,27
70	2,16	0,78	0,19
95	1,54	0,56	0,14
120	1,25	0,45	0,11
150	1,05	0,38	0,09
185	0,79	0,28	0,07
240	0,61	0,22	0,05

In accordance with the requirements of IEC 62420, heat-resistant wires must be manufactured with a gap between the steel core and the aluminum zirconium wires (see Fig. 1, b). Constructively, this can be achieved only if the profiled wires are used. This causes a rise in the cost of making the wire. Consider how technically justified this is.

The creation of a wire with a gap was intended to transfer the entire mechanical load to the steel core. In this case, the wire ceases to work as a composite material made of steel and aluminum wires. Its mechanical properties are determined by the properties of the steel core (coefficient of thermal expansion (CTE), modulus of elasticity, etc.), so a smaller CTE of steel determines a smaller sag due to a smaller elongation with increasing operating temperature. Comparative characteristics of the wire sag, depending on the achieved operating temperature on the basis of the data of are shown in Fig. 3.

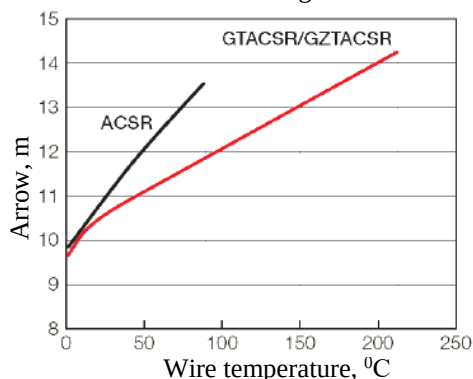


Figure 3. Dependence of the sagging arrow on the temperature for a wire with a gap and an AC wire.

The curve in black represents the dependence for the

ACSR wire (Aluminum Conductor Steel Reinforced), the curve in red - the dependence for the wire from the innovative material of the brand GTACSR and GZNFCSR.

However, a more complex design of the wire leads to a complication of the technology of its manufacture. At the same time, the use of such a design necessitates the use of more sophisticated technology for the installation of wires and, as a consequence, the need to develop and use special equipment and fittings. This requirement is due to the need to fix the wire to the insulators behind the steel core, since the traditional fastening minimizes all the positive advantages of this design. The same causes are also due to a more complicated repair of the wire, which does not exist in Ukraine. All this together causes the need for more qualified personnel.

It can be assumed that it was these considerations that guided Lumpi-Berndorf, making the decision to produce TACSR (Thermally-resistant Aluminum-alloy Conductor Steel Reinforced) wires on the territory of the European Union based on the standard [14]. Structurally, these wires correspond to wires of the brand AC.

The classic aluminum wires of the overhead lines are structurally identical to the TACSR / ACS and (Z) TACSR / HACIN wires. There is the possibility of mounting these wires with the help of already known types of armature, the production of which is adjusted and put on stream. As a consequence, the need to master the new installation technology, as well as the purchase of equipment and the upgrading of the skills of the workforce, is no longer necessary. Thus, the company Lumpi-Berndorf during the installation and repair of the wire uses the same methods as for installing and repairing the standard AC wire. However, it is worth noting the need to use specially designed valves for operation at high temperatures.

V. CONCLUSION

The possibility of increasing the capacity of overhead power transmission lines while maintaining the wire cross-section, using an innovative material based on an aluminum-zirconium alloy, is proved.

The design of the wires according to IEC 62420 has a number of advantages over the classical design. However, the transition to the use of this structure is difficult. The construction of the wire in accordance with GOST 839-80 with the replacement of aluminum by aluminum, dispersed by nano-particles $AlZr_3$, is able to withstand the growing loads in the power supply network.

Heat resistant wires based on aluminum-zirconium have already been used and standardized by the United States and in the European Union. However, the construction of wires based on these standards is not the most optimal for their use on the territory of Ukraine.

Using the new material allows you to increase the capacity of the overhead power line while maintaining the wire section (more than twice), or reduce the mass of active wire material by 40% without reducing the voltage class.

The optimal design of the wires based on the innovative material from the aluminum-zirconium alloy for electric transmission lines, permissible for use on the territory of Ukraine, is determined.

To implement and use heat-resistant wires in Ukraine, it is necessary to implement their production and solve problems associated with the release and registration of existing regulatory materials.

The article was received 07.03.2018

АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ІННОВАЦІЙНИХ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИХ ПРОВІДІВ ДЛЯ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ

ЛУЩИН С.П.

канд. фіз.-матем. наук, доцент кафедри фізики Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, Україна, e-mail: luschin@zntu.edu.ua;

БОРКОВСЬКИХ А.В.

магістрант кафедри електричних машин і апарати Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, Україна, e-mail: aayy6491@gmail.com;

БОРКОВСЬКИХ М.В.

магістрант кафедри електричних машин і апарати Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, Україна, e-mail: kalbkab96@gmail.com;

Мета роботи. Визначення пропускної здатності проводів повітряних ліній електропередачі на основі інноваційних матеріалів без зміни використовуваних в даний час конструкцій, а також можливості підвищення класу напруги повітряних ліній електропередачі при використанні проводів на основі алюмінієво-цирконієвих матеріалів.

Методи дослідження. Аналітичний метод визначення пропускної здатності проводів повітряних ліній електропередачі. Порівняльний аналіз електротехнічних характеристик проводів повітряних ліній електропередачі.

Отримані результати. Доведено можливість збільшення пропускної спроможності повітряних ліній електропередачі при збереженні перетину дроту, при використанні інноваційного матеріалу на основі сплаву

алюміній-цирконій. Обґрунтовано зниження маси дроту на основі інноваційних матеріалів при збереженні пропускної здатності по току. Виявлено переваги та недоліки європейських конструкцій проводів для повітряної лінії електропередачі при використанні інноваційного матеріалу, на основі сплаву алюміній-цирконій. Визначено оптимальну конструкцію проводів на основі інноваційного матеріалу зі сплаву алюміній-цирконій для повітряних ліній електропередач, допустима для використання на території України.

Наукова новизна. Доведено доцільність використання традиційних конструкцій проводів повітряних ліній електропередачі, в разі застосування інноваційного матеріалу. Обґрунтовано можливість підвищення класу напруги повітряних ліній електропередачі при використанні проводів на основі алюмінієво-цирконієвих матеріалів.

Практична цінність. Отримано результати щодо електричної стійкості повітряних ліній електропередачі до пікових навантажень, з урахуванням незначних витрат на модернізацію при використанні інноваційного матеріалу на основі сплаву алюмінію і цирконію. Використання інноваційного матеріалу створює умови для підвищення класу напруги повітряних ліній електропередач, що дозволяє проводити збільшення переданої потужності до споживача. Використання матеріалів на основі алюмінієво-цирконієвих сплавів дозволяє проводити заходи щодо реконструкції мереж електричного постачання без заміни опор та додаткових робіт щодо землевідведення, як у випадку проведення реконструкції без збільшення класу напруги лінії електропередач, так і в разі підвищення класу напруги.

Ключові слова: повітряна лінія електропередачі; алюміній легований цирконієм; пропускна здатність; марки проводів.

АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ИННОВАЦИОННЫХ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ПРОВОДОВ ДЛЯ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

ЛУЩИН С.П.

канд.физ.-матем. наук, доцент кафедры физики Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина, e-mail: luschin@zntu.edu.ua;

БОРКОВСКИХ А.В.

магистрант кафедры электрические машины и аппараты Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина, e-mail: aayy6491@gmail.com;

БОРКОВСКИХ М.В.

магистрант кафедры электрические машины и аппараты Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина, e-mail: kalbkab96@gmail.com;

Цель. Определение пропускной способности проводов воздушных линий электропередачи на основе инновационных материалов без изменения используемых в настоящее время конструкций, а также возможности повышения класса напряжения воздушных линий электропередачи при использовании проводов на основе алюминево-циркониевых материалов.

Методы исследования. Аналитический метод определения пропускной способности проводов воздушных линий электропередачи. Сравнительный анализ электротехнических характеристик проводов воздушных линий электропередачи.

Полученные результаты. Доказана возможность увеличения пропускной способности воздушных линий электропередачи при сохранении сечения провода, при использовании инновационного материала на основе сплава алюминий-цирконий. Обосновано снижение массы провода на основе инновационных материалов при сохранении пропускной способности по току. Выявлены преимущества и недостатки европейских конструкций проводов для воздушной линии электропередачи при использовании инновационного материала, на основе сплава алюминий-цирконий. Определена оптимальная конструкция проводов на основе инновационного материала из сплава алюминий-цирконий для воздушных линий электропередач, допустимая к использованию на территории Украины.

Научная новизна. Доказана целесообразность использования традиционных конструкций проводов воздушных линий электропередачи, в случае применения инновационного материала. Обоснована возможность повышения класса напряжения воздушных линий электропередачи при использовании проводов на основе алюминево-циркониевых материалов.

Практическая ценность. Получены результаты относительно электрической стойкости воздушных линий электропередачи к пиковым нагрузкам, с учетом незначительных затрат на модернизацию при использовании инновационного материала на основе сплава алюминия и циркония. Использование инновационного материала создает условия для повышения класса напряжения воздушных линий электропередач, что позволяет

проводить увеличение передаваемой мощности к потребителю. Использование материалов на основе алюминиево-циркониевых сплавов позволяет проводить мероприятия по реконструкции сетей электрического снабжения без замены опор и дополнительных работ по землеотводу, как в случае проведения реконструкции без увеличения класса напряжения линии электропередач, так и в случае повышения класса напряжения.

Ключевые слова: воздушная линия электропередачи; алюминий, легированный цирконием; пропускная способность; марки проводов.

REFERENCES

- [1] Dyachenko, V. (2015). Creation of energy saving program for power supply systems. *Electrical Engineering And Power Engineering*, 1, 70-76. doi:http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2015-1-12 (in Russian).
- [2] Tsyplenkov, D., Krasovskiy, P. (2015). Methods and means of technical losses reduction of electricity in the elements of power supply systems. *Electrical Engineering And Power Engineering*, 1, 77-82. doi:http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2015-1-13 (in Russian).
- [3] GOST 839-80. Provoda neizolirovannye dlja vozdušnyh linij jelektrouperedachi. Tehničeskie uslovija. dejstvujushhij s 1999 - 01- 01 – IPK izdatel'stvo standartov, [Uninsulated wires for overhead power lines. Technical conditions. operating since 1999 - 01-01 - IPC publishing standards], 1981, 22s.
- [4] Klimenko, M.M., Egorova, O.Ju. (2011). Analiz effektivnosti vikoristannja isnujuchih zasobiv pidvišhennja propusknoï zdatnosti linij jelektrouperedach. [Analysis of the efficiency of the use of existing means of increasing the transmission capacity of transmission lines]. *Sistemi ozbroennja i vijs'kova tehnika*, 1, 96-100. (in Ukrainian).
- [5] Zotov, D.R. (2015). Linii jelektrouperedachi. Povyšenie peredavaemoj moshhnosti. [Power lines. Increase in transmitted power]. *Novosti JelektrouTehniki*, 2(92), 42-44. (in Russian).
- [6] Kur'janov, V.N., Sultanov, M.M., Fokin, V.A., Timashova, L.V. (2016). Innovacionnye vysokojefektivnye provoda dlja linij jelektrouperedachi. [Innovative high-performance wires for power lines]. *Jenergija edinoj seti*, 4(27), 70-78. (in Russian).
- [7] Alekseev, B.A. (2009). Povyšenie propusknoj sposobnosti vozdušnyh linij jelektrouperedachi i primenenie provodov novyh marok. [Increase in the capacity of overhead power lines and the use of wires of new brands]. *Elektro. Jelek-trotehnika, jelektroujenergetika, jelektroutehničeskaja promyšlennost'*, 3, 45-50. (in Russian).
- [8] Petrova, E.V., Bigun, A.Ja., Gorjunov, V.N., Girshin, S.S., Bubenčikov, A.A. (2013). Rasčjot pogresh-nostej opredelenija poter' jelektričeskoj jenergii v provodah povyšhennoj propusknoj sposobnosti iz-za ne uchjota atmosferyh i rezhimnyh faktorov. [Calculation of errors in determining the losses of electrical energy in wires with increased throughput, because of not taking into account atmospheric and regime factors]. *Omskij nauchnyj vestnik*, 2(120), 191-197.
- [9] Matveeva, I.A. (2014). Issledovanie i razrabotka tehnologii proizvodstva aljuminievoj katanki s dobavkoj cirkonija sposobom nepreryvnogo lit'ja i prokatki s cel'ju poluchenija iz nee termostojkih provodov LJeP. [Research and development of technology for the production of aluminum rod with zirconium additive by the method of continuous casting and rolling with the purpose of obtaining heat-resistant wires from it], 149s.
- [10] Dostaeva, A.M. (2015). Obosnovanie sostava i rezhima termoobrabotki provodnikovyh Al-Zr splavov, poluchaemyh v vide katanki. [Substantiation of the composition and regime of heat treatment of conductor Al-Zr alloys, obtained in the form of wire rod], 109.
- [11] Zakon Ukrainy ot 16.10.1997 № 575/97- VR «Pro elektroenergetiku». – Rezhim dostupu: http://zakon4.rada.gov.ua/laws/main/575/97-vr. – Nazvanie s ekrana.
- [12] Ciganenko, B.V., (2017). Efektivnist' roboti rozpodil'nih elektrichnih merezh pri pidvišhenni ih klasu naprugi. [Efficiency of distribution electric networks at increase of their class of voltage], 271.
- [13] Ciganenko, B.V., Kirik, V.V. (2016). Osoblivosti funkcionuvannja rozpodil'nih merezh seredn'ogo klasu naprugi ta ih perevedennja na napругu 20 kV, [Features of the functioning of distribution networks of the middle class voltage and their transfer to voltage of 20 kV]. *Hydropower of Ukraine*, 3-4, 7-13. (in Ukrainian).
- [14] (2007). IEC 62004. Thermal-resistant aluminium alloy wire for overhead line conductor. first edition 2007-02 – international electrotechnical commission, 16.
- [15] ASTM B941-16. Standard Specification for Heat Resistant Aluminum-Zirconium Alloy Wire for Electrical Purposes.
- [16] Timashova, L.V., Nikiforov E.P., Nazarov, I.A., Merzljakov, A.S., Ermoshina, M.S., Kachanovskaja, L.I., Konstantinova, E.D., Romanov, P.I., Ko-losov, S.V., Shkapcov. V.A. (2014). Povyšenie nadjozhnosti vozdušnyh linij jelektrouperedachi pri primenenii provodov novogo pokolenija. [Increasing the reliability of overhead power lines when using new generation wires]. *Jenergija edinoj seti*, 5(16), 6-14. (in Russian).

УДК 621.311+620.92

КОМБІНОВАНА МОБІЛЬНА СИСТЕМА ОСНОВНОГО І РЕЗЕРВНОГО ЖИВЛЕННЯ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАЧІВ МАЛОЇ ТА СЕРЕДНЬОЇ ПОТУЖНОСТІ

ШКРАБЕЦЬ Ф.П. доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри відновлюваних джерел енергії Національного технічного університету “Дніпровська політехніка”, Дніпро, Україна
e-mail: ShcrabetsF@nmu.org.ua;

БЕРДНИК В.В. аспірант кафедри відновлюваних джерел енергії Національного технічного університету “Дніпровська політехніка”, Дніпро, Україна e-mail: Berdnik.V.V@nmu.one.

Мета. Мета роботи полягає в розробці мобільної комбінованої системи основного і резервного живлення на основі відновлюваних і традиційних джерел енергії для електроживлення малопотужних споживачів у віддалених від загальної електромережі регіонах; в описанні конструкції запропонованої системи; в розробці блок-схеми алгоритму контролю і управління елементами системи задля досягнення найбільш ефективного енергоживлення споживачів при подальшому впровадженні та удосконаленні системи.

Методи дослідження. Для проведення досліджень використані: метод аналітичної обробки оглядових матеріалів з питання стану розвитку альтернативної енергетики на сучасному етапі та існуючих на сьогодні проблем, щодо енергозабезпечення малопотужних віддалених енергоустановок, а також шляхів їх подолання завдяки моделюванню можливих систем безперебійного живлення; метод системного аналізу комплексної оцінки потенціалу комбінованої мобільної системи основного та резервного живлення на основі сучасних комп'ютерних технологій.

Отримані результати. При аналізі матеріалів робіт відповідно до тематики дослідження, виявлено та доведено доцільність створення та подальшого удосконалення систем комбінованого електроживлення малопотужних споживачів з метою забезпечення енергобалансу Дніпровського регіону (Україна). Запропоновано варіант конструкції комбінованої системи на основі традиційних і відновлюваних джерел: зокрема, розроблено блок-схему алгоритму контролера управління комбінованою системою. Представлено механізм дії запропонованої блок-схеми алгоритму, а також отримані та проаналізовані графічні залежності: коефіцієнту потужності від величини швидкохідності вітроагрегату $C_p=f(Z)$; механічного моменту вітротурбіни від коефіцієнту швидкохідності реальної вітроустановки $M=f(Z)$. Представлено результати розрахунку виробітку електроенергії, W , [кВт·год] протягом року потенційною вітроелектроустановкою.

Наукова новизна полягає в запропонованій блок-схемі алгоритму контролю і управління комбінованою системою резервного електропостачання, яка дозволяє двигунам вітроустановки та дизельного агрегату поперемінно працювати на один загальний електрогенератор.

Практична цінність роботи полягає у створенні системи гарантованого енергозабезпечення та розподілу електроенергії для малопотужних споживачів енергії різного призначення; підвищенні ефективності, гнучкості та надійності системи і, в кінцевому рахунку, зменшенні енергетичної залежності країни від імпорту традиційних викопних енергоресурсів, перетворення яких призводить до негативних наслідків щодо екології країни. Впровадження запропонованої блок-схеми алгоритму контролю і управління енергосистемою дозволить знизити витрати на її обслуговування, наприклад, поточний ремонт, тощо та, відповідно, вартість системи вцілому.

Ключові слова: резервне електропостачання; енергоспоживання, відновлювані джерела енергії; комбінована система; вітроелектрогенератор; двигун; дизельний агрегат; потужність; блок-схема; мобільність, ефективність, залежність.

І. ВСТУП

У зв'язку з існуючими проблемами, викликаними нестачею викопних видів палива і їх шкідливим впливом на навколишнє середовище, виникає потреба у розробці та використанні нових енергозберігаючих технологій на основі відновлюваних джерел енергії.

Велику роль сьогодні відіграють системи резервного живлення. Оскільки виникнення аварійних си-

туацій в електромережі, або зупинка в роботі установок може спричинити значні збитки, резервне живлення є необхідною умовою, насамперед, для споживачів відповідальних категорій.

Питання забезпечення електроенергією мобільних установок та віддалених автономних об'єктів невеликої потужності в наш час стають актуальними у зв'язку з необхідністю обґрунтування технічної та економічної доцільності створення систем транспор-

тування електроенергії. При цьому, поки що не розроблені можливості використання нетрадиційних і відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) для живлення названих споживачів. Дані технології можуть бути реалізовані в сфері малопотужних, до 10 кВт, споживачів, з метою забезпечення їх безперебійного електроживлення. Більш детальний аналіз споживачів приведений у роботі [1].

Системи резервного живлення малопотужних установок та об'єктів середньої потужності зазвичай використовують як джерело електроенергії, виробленої за рахунок спалювання викопного палива. Таким чином, при впровадженні систем безперервного живлення використовують двигуни внутрішнього згоряння різних типів у комбінації з генератором. У більшості випадків живлення від генераторів не є як економічно, так і енергетично доцільним, на відміну від систем резервного живлення на основі ВДЕ.

Генератори до 10 кВт, особливо бензинові і газові, на відміну від інверторних систем резервного живлення, зазвичай не мають стабілізації напруги за частотою – це супроводжується гармонійними викривленнями виробленого струму, що може призвести до некоректної роботи і виходу з ладу чутливого устаткування. Генератори при роботі створюють шум близько 65dB. Також недоліком при роботі генераторної установки є наявність викидів вихлопних газів (CO, CO₂, NO та ін.). Витрати на паливо, у випадку використання генераторів за час експлуатації можуть перевищувати вартість самого генератора в n разів. Існує необхідність постійного технічного контролю генераторів в середньому кожні 100 – 200 мотогодини (дешеві моделі – частіше): долив палива, заміна масла, охолоджуючої рідини, фільтрів, регулювань і т.д. Слід також врахувати ціни на комплектуючі витратні матеріали, такі як фільтри, масло тощо. Системи резервного живлення на базі інверторів, наприклад, є повністю необслуговуваними.

Використання електрогенераторів передбачає впровадження напівпровідникових систем керування. Використання декількох генераторів суттєво збільшує габарити регулятора, що значно підвищує його вартість та вартість усієї установки [2].

Генераторні системи резервного живлення використовуються здебільшого в регіонах, в яких, підведення стаціонарних або тимчасових ЛЕП для живлення віддалених споживачів економічно недоцільно, оскільки потребує значних капітальних вкладень. Використання дизельних генераторів має масу недоліків, від необхідності своєчасного ремонту до малого терміну служби, але задля досягнення безперебійного енергозабезпечення споживачів, відмовитися від них повністю неможливо. З метою економії пального, зниження залежності від зовнішніх поставок енергоресурсів, зменшення впливу на екологію, а також для забезпечення безперебійності роботи обладнання існує необхідність у створенні автономних систем основного і резервного живлення на базі ВДЕ у комбі-

нації з електрогенераторами. В даній роботі пропонується варіант комбінованої мобільної системи безперервного живлення (КМС) на базі вітродвигуна та дизельного двигуна, працюючих на один генератор. Впровадження запропонованої системи дозволить уникнути недоліків, пов'язаних з використанням декількох електрогенераторів в одній системі та, в свою чергу, КМС матиме переваги енергетичних установок на базі ВДЕ.

Дана система буде використовуватися для резервного живлення віддалених від загальної системи електропостачання споживачів, а саме живлення малопотужних електроприладів, нагріву води, тощо.

II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Серед публікацій закордонних науковців і дослідників чітко виділяється тенденція до використання ВДЕ у якості джерел живлення мобільних споживачів, які віддалені від загальної мережі електропостачання, а також до впровадження комбінованих систем резервного живлення на основі вітрогенераторів.

В якості одного з найбільш перспективних джерел енергії виділяють енергію сонячного випромінювання. У роботі [3] зазначається, що сонячна енергія є найкращим варіантом через її поширеність, значне сонячне випромінювання та загальний надлишок в природі. В свою чергу, вітер – невичерпне джерело енергії, використання якої у порівнянні з іншими ВДЕ може сприяти підвищенню ефективності енергоустановок [3].

Згідно [4], використання систем збереження дозволяє досягти плавної кривої генерованої потужності. Вітродизельні системи мають постійно зростаюче значення рентабельності, що говорить про їхню ефективність [5].

В [6], стосовно комбінованих гібридних систем на основі двигунів внутрішнього згоряння, дизельні двигуни рекомендується використовувати у якості джерела резервної потужності.

В інших роботах пропонуються схемні рішення автономних комбінованих систем електропостачання на базі фотоелементів та використання додаткових пристроїв, концентраторів, за рахунок яких можливо збільшити частку перетворюваного в електроенергію сонячного випромінювання.

Останні видані закордонні публікації на досліджувану тематику можна знайти у авторів з багатьох європейських та інших країн, серед яких є автори з Великобританії [7], [8], які досліджують проблему автономного віддаленого постачання енергоносіїв для сільського господарства; Іспанії, роботи яких пов'язані з приладами перетворення енергії та контролерами управління системами автономного електрозабезпечення [9], [10]. У роботах авторів з Індії також вирішується питання управління системами електропостачання на основі відновлюваних джерел [11]. У роботах Французьких дослідників вирішується за-

вдання інтеграції енергосистем до розумної мережі (Smart Grid) [12], [13]; в роботах авторів Саудівської Аравії, наприклад в [14], також вивчаються системи резервного електрозабезпечення на відновлюваних джерелах. Проблемою забезпечення електроенергією віддалених споживачів займаються також науковці Малайзії, Італії, та інших країн.

В публікаціях авторів вирішується питання ефективного впровадження відновлюваних джерел в системи резервного живлення віддалених від загальної енергомережі енергетичних об'єктів.

Питання автономних систем резервного електропостачання також широко вивчається й у країнах пострадянського простору. Так, автори вивчають можливості розробки та використання систем на базі ВДЕ з метою зменшення шкідливих викидів.

Принцип роботи КМС з одним електрогенератором, аналогічний запропонованому в даній роботі, розглядався у [15]. В більшості робіт була запропонована схема комбінованої роботи вітрового та теплового агрегату з використанням двох муфт вільного ходу. В [15] навпроти, розглядається комбіновані автономні вітроелектричні системи з використанням як дизельних, так і вітрогенераторів.

Таким чином, тема резервного постачання енергоносіїв, віддаленим від електромережі споживачам сьогодні є досить актуальною та досліджуваною. На сьогоднішній день існує необхідність створення такої системи, яка б характеризувалась якомога більшою ефективністю.

III. МЕТА РОБОТИ

Мета роботи полягає в розробці мобільної комбінованої системи основного і резервного живлення на основі відновлюваних і традиційних джерел енергії для електроживлення малопотужних споживачів у віддалених від загальної електромережі регіонах; в описанні конструкції запропонованої системи; в розробці блок-схеми алгоритму контролю і управління елементами системи задля досягнення найбільш ефективного енергоживлення споживачів при подальшому впровадженні та удосконаленні системи.

IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГУ МАТЕРІАЛУ І АНАЛІЗ ОТРИМАННИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Конструкція КМС. Запропонована в даній роботі система представляє собою послідовну роботу двигунів вітроустановки та дизельного агрегату на один генератор. Конструкція системи дозволить досягти безперервного живлення споживачів малої та середньої потужності за рахунок використання того чи іншого двигуна. При оптимальних факторах навколишнього середовища, живлення споживачів відбувається за рахунок роботи вітрогенератора. В свою чергу, при зниженні швидкості вітру до граничного значення, при якому генерована потужність не буде досягати необхідного рівня, система деякий час працюватиме

від акумуляторних батарей. В якості резервного джерела живлення акумуляторних батарей встановлено фотоелектричні елементи. Якщо протягом тривалого часу швидкість вітру не відновиться до необхідного рівня, система переключиться на роботу від дизельного. Таким чином, живлення електроспоживачів буде безперервним та не буде залежати від зовнішніх факторів. Функціональна схема установки представлена на рисунку 1.

Конструктивно, система змонтована на причепі, який має відповідні розміри ширини довжини та висоти 2550х4340х2625 мм, тобто є мобільною (пересувною), в залежності від потреб споживача. Щогла вітроустановки, з вертикальною віссю обертання та ротором Дар'є висотою 8000 мм, кріпиться у трьох точках задля досягнення більшої стійкості всієї конструкції. В системі встановлено блок акумуляторних батарей ємністю 800 А·год, змонтовано дизельний двигун потужністю 7,5 кВт, вітроустановку потужністю 5 кВт та генератор 7,5 кВт.

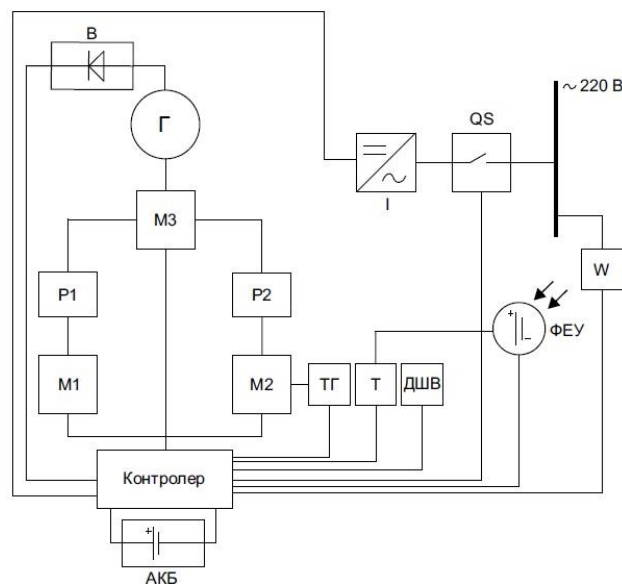


Рисунок 1. Функціональна схема мобільної системи резервного живлення

Для передачі обертових моментів, вали вітроустановки та дизельного двигуна, за допомогою електричних муфт, під'єднані до електрогенератора через редуктор, який необхідний для зрівноваження обертів відповідних двигунів. На рис. 1, Р1 та Р2 – редуктори, які вирівнюють швидкість обертання валів двигунів, які виведені за допомогою електромагнітних муфт М до генератора Г. Дані редукторні пристрої короби передачі під'єднані до М1 – муфти дизельного двигуна та М2 – вітроустановки. Контролер служить для автоматичного управління переключенням електромагнітних муфт, перевірки залишкової ємності акумуляторних батарей, підзарядки АКБ за рахунок двигунів або фотоелементів та вимірювання величини генерованого струму ВЕУ. Механічна частина систе-

ми працює на електрогенератор. Випрямлений струм протікає через контролер де за рахунок напівпровідникових пристроїв набуває необхідної величини та якості. Оскільки швидкість вітру не є постійною величиною, а акумуляторні батареї заряджаються постійним струмом, на виході електрогенератора встановлені випрямляючі пристрої. Для вимірювання кількості обертів ВЕУ, на вал вітроустановки встановлено тахометр, датчик швидкості вітру та прилади для вимірювання сонячної радіації та температури. Отримані дані передаються на контролер. Установка обладнана додатковим баком ємністю 500 л для збільшення ресурсу автономної роботи системи.

На рис. 2 представлено структурну схему комбінованої мобільної системи електроживлення (КМС).

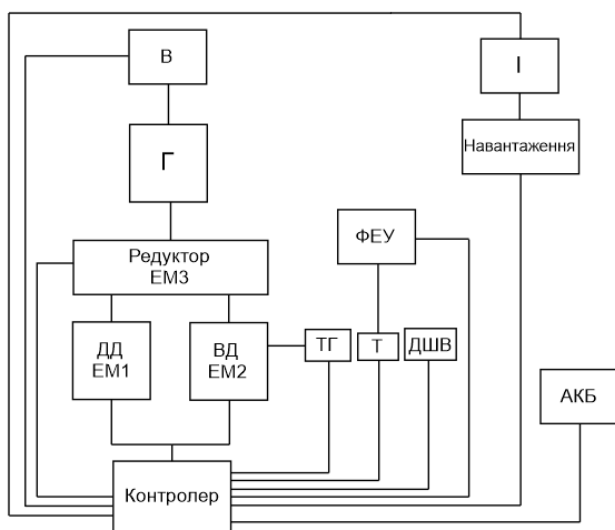


Рисунок 2. Структурна схема КМС

На рис. 2 основним елементом системи виступає контролер, за допомогою якого перевіряються величини швидкості вітру, температури повітря, сонячної радіації та обертів вала вітроустановки. Зазначеними пристроями служать датчик швидкості вітру ДШВ, електричний термометр Т, тахогенератор ТГ. Необхідна інформація про стан заряду акумуляторних батарей та наявність навантаження надходить відповідно з блоків АКБ і навантаження. Після аналізу даних, контролер виконує підключення однієї з електромагнітних муфт ВД ЕМ2 вітроустановки або ДД ЕМ1 дизельного двигуна відповідно до редуктора через муфту ЕМ3. Також, у випадку неможливості роботи обох двигунів, контролер аналізує варіант живлення навантаження від АКБ через інвертор І. При відсутності навантаження, в контролер закладено функцію зарядки АКБ від ВД, ДД, або від ФЕУ, - фотоелектричної установки. Електромагнітна муфта редуктора ЕМ3 підключена до електрогенератора Г. В залежності від наявності навантаження, вироблена електроенергія передається через випрямляч В до блоку контролера, де перетворюється до необхідної величини пот-

рібної якості, далі до блоку АКБ, з метою їх підзарядки, або до інвертора І. Останній, в свою чергу живить навантаження.

Оскільки потужність ФЕУ є незначною, а основним джерелом живлення є вітроустановка та дизельний двигун, розрахунок потужності ФЕУ в даній роботі не приводиться.

Блок-схема алгоритму роботи контролера системи приведена на рис. 3.

Потужність дизельної установки повинна бути більшою, ніж потужність вітроустановки [16], [17].

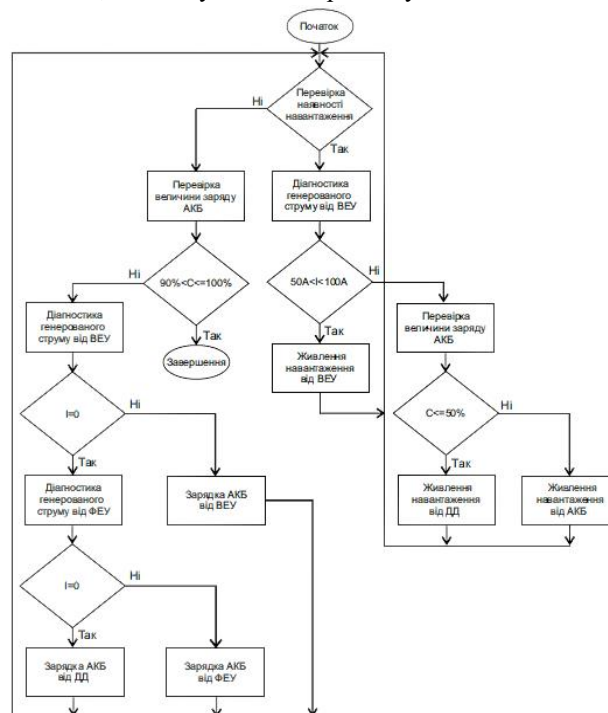


Рисунок 3. Блок-схема алгоритму роботи КМС

Ємність баку дизельного агрегату потужністю 7,5 кВт за паспортними даними становить 20 л. При споживанні палива 1,75 л/год, дана установка зможе працювати в автономному режимі та при повному завантаженні до 11 годин.

Додатковий бак ємністю 500 л дозволить збільшити час роботи до 295 годин, тобто 12 днів безперервної роботи. Встановлення баку необхідне у випадку передбачення недостатньої швидкості або відсутності вітряних потоків.

У разі відсутності або недостатньої швидкості вітру, система переключається на живлення навантаження від акумуляторних батарей. Ємності АКБ повинно вистачити на період відновлення вітру, в іншому випадку навантаження живиться від дизельного двигуна. Як було зазначено вище, ємність АКБ становить 800 А*год.

В залежності від регіону, середня швидкість вітру змінюється в більшу чи меншу сторону. Відсоток

виникнення тих чи інших градацій швидкості також має непостійну величину. Таким чином, з метою ефективного використання системи, в економічному та технічному плані, необхідно вибрати місцевість зі сприятливими погодними умовами.

Розрахунок середньої генерованої потужності вітроустановки S.A.V – 5 кВт на протязі року

Для прикладу візьмемо ВЕУ марки SAV з вертикально віссю обертання. Технічні характеристики приведені у табл. 1.

Таблиця 1. Технічні характеристики ВЕУ S.A.V - 5 кВт

Діаметр вітротурбіни, м	3,6
Висота лопаті, м	4
Кількість лопатей, шт	5
Номинальна кількість обертів ротора, об/хв	80-100
Номинальна потужність, Вт	5000
Максимальна потужність, Вт	5500
Початкова швидкість вітру, м/с	2,5
Номинальна швидкість вітру, м/с	8
Робоча швидкість вітру, м/с	3-20
Висота щогли, м	8
Маса ВЕУ, кг (без щогли)	440
Коефіцієнт використання енергії вітру	>0,42
Тип генератора	3-х фазний на постійних магнітах
Частота генератора, Гц	0-50
Струм генератора	змінний
Номинальна напруга на виході ВЕУ, В	48
Номинальний струм, А	100
Максимальний струм, А	110
Рівень шуму, Дб	40

Далі проведемо аналіз кліматичних умов для розміщення КМС на території України. Виконаємо розрахунок річної генерованої потужності вітроустановки.

Потужність ВЕУ з вертикальною віссю обертання, розраховується аналогічно потужності горизонтальних вітроустановок, за винятком розмірів поверхні, яку обмахують повітряні потоки. Таким чином згідно [19],

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V^3 \cdot C_p \cdot K_{el} \cdot K_{mex} \quad \text{Вт} \quad (1)$$

де $\rho=1,225$ – густина повітря, кг/м³; S – фронтальна площа вітротурбіни; V – швидкість вітру, м/с; C_p –

коефіцієнт використання енергії вітру; K_{el} – ККД генератора (на постійних магнітах 0,8), K_{mex} – ККД трансмісії (ККД підвищуючого редуктора 0,7 – 0,9).

В нашому випадку фронтальна площа вітротурбіни [18]:

$$S = D \cdot H = 3,6 \cdot 4 = 14,4 \text{ м}^2 \quad (2)$$

де D – діаметр вітроколеса, м; H – висота лопаті, м.

Характеристику вітроколеса звичайно наводять у вигляді залежностей коефіцієнта C_p і обертового моменту M від величини швидкохідності Z . Коефіцієнт C_p – один із головних параметрів, що характеризує ефективність вітротурбіни. Його величина визначає середнє вироблення електроенергії на конкретній установці [18]. Максимально можливе значення коефіцієнта потужності дорівнює $C_{p\max}=0,593$ – теоретична межа Бетца. У практичних розрахунках враховують вплив на величину C_p типу вітроколеса, в результаті чого він зменшується і складає:

$$C_p = (0,3 - 0,8) \cdot C_{p\max} \approx 0,18 - 0,48 \quad (3)$$

Менше значення C_p відноситься до багатолопатевого тихохідного ВЕУ з вертикальною віссю обертання, більше – до горизонтально-осьових ВЕУ з двома-трьома лопатями.

Коефіцієнт швидкохідності Z визначають як відношення колової швидкості u кінців лопатей до швидкості вітру V :

$$Z = \frac{\omega \cdot R}{V} = \frac{u}{V} \quad (4)$$

де R – радіус кола, що обмахується кінцевими елементами лопатей; ω – кутова частота, рад/с, $\omega = \frac{\pi \cdot n}{30}$

(для ВЕУ S.A.V $\omega = \frac{\pi \cdot 100}{30} = 10,47$); u – значення колової швидкості на кінцях лопатей, м/с, $u = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60}$, де n – частота обертання, об/хв; D – діаметр вітроколеса, м.

Величина Z знаходиться в межах 0,2...10: для великих ВЕУ $Z>1$, для ВЕУ з великою кількістю лопатей $Z\approx 3$, для ВЕУ з трьома лопатями і великою швидкістю обертання $Z\approx 6...10$.

При аналізі кривої $C_p=f(Z)$ [18], було виявлено, що при відомих значеннях швидкохідності для максимальної та оптимальної потужності, а також точки максимального коефіцієнта потужності, вона добре апроксимується за допомогою кубічної параболі:

$$C_p = C_{p\max} \cdot \left(\frac{Z}{Z_{onm}} \right)^2 \cdot \left[-2 \cdot \left(\frac{Z}{Z_{onm}} \right) + 3 \right] \quad (5)$$

де, з урахуванням паспортних даних, ВЕУ $C_{p\max}=0,45$;

$$Z_{\text{омт}} = \frac{10,47 \cdot 1,8}{10} = 1,884. \quad \text{Обертальний (механічний)}$$

$$\text{момент БЕУ дорівнює } M = \frac{P}{\omega}.$$

Залежності $C_p=f(Z)$ та $M=f(Z)$ для БЕУ S.A.V представлені на рис.4 та 5. З рис. 4 видно, що величина $C_{p\text{макс}}$, при якій спостерігається найбільше значення генерованої потужності БЕУ, відповідає значенню $Z_{\text{опт}}$.

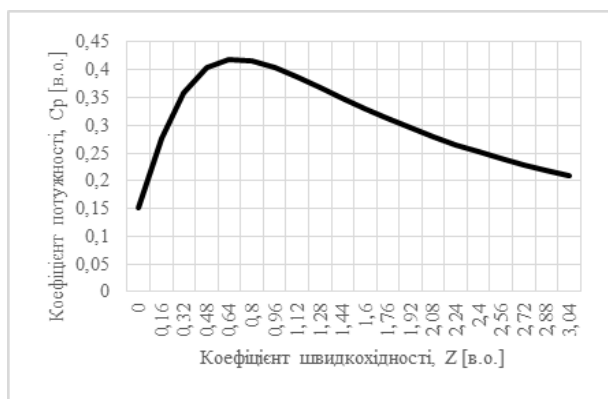


Рисунок 4. Залежність коефіцієнту потужності від значення швидкохідності вітроагрегату

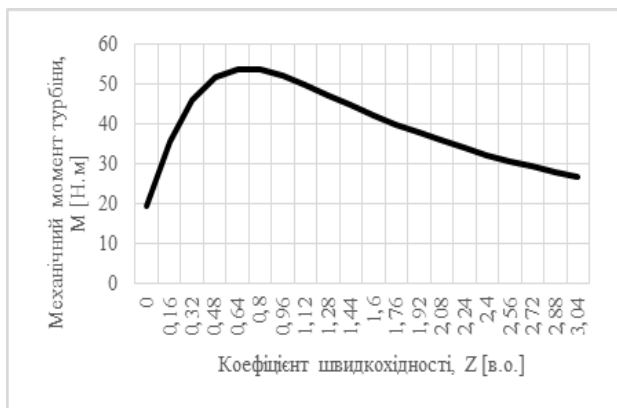


Рисунок 5. Залежність величини механічного моменту вітроагрегату від коефіцієнту швидкохідності

Існує критерій, побудований на основі середньорічної швидкості вітру, при якій БЕУ рентабельна й окупає себе [18]. Ця швидкість знаходиться в діапазоні 5,1 ... 5,9 м/с. Даний критерій не враховує використання додаткових джерел живлення, зокрема дизельних або бензинових агрегатів.

Згідно [20], на практиці використовуються два варіанти розрахунку максимально ймовірного річного виробітку енергії вітроагрегатом.

Перший – з використанням результатів спостережень на метеостанціях, в яких повторюваність швидкостей вітру приводиться по шести градаціях: 2-5; 6-9; 10-13; 14-17; 18-20 та більше 20 м/с. Другий варіант розрахунку ґрунтується на використанні апроксимації експериментальних даних повторюваності

швидкостей вітру двоохпараметричним розподіленням Вейбулла. Згідно [20], порівняння результатів розрахунку за двома варіантами має розбіжність 2,5%. Така величина є цілком прийнятною для приблизних розрахунків виробітку енергії.

Нормальні кліматичні умови, при яких буде виконуватися розрахунок БЕУ: атмосферний тиск 760 мм. рт. стовпа та температура повітря +15°C. Для розрахунку виробітку енергії БЕУ, які мають висоту щогли більше або менше 10 м, середню швидкість вітру слід перерахувати за наступною формулою:

$$V = V_1 \cdot \left(\frac{H}{H_1} \right)^{\frac{1}{5}}, \quad V = V_1 \cdot \frac{\lg \frac{H}{H_0}}{\lg \frac{H_1}{H_0}}, \quad (6)$$

де V_1 – швидкість вітру, виміряна поблизу землі на висоті H_1 ; V – шукана швидкість на висоті H ; H_0 – висота, на якій швидкість вітру дорівнює нулю. Величина H_0 залежить від шорсткості поверхні, що підстилає (для сніжного покриття $H_0 \approx 0,5$ см, для поверхонь з низькою травою $H_0 \approx 3,2$ см, з більш високими рослинами $H_0 \approx (5 \dots 7)$ см, $H_{0\text{макс}} = 20$ см) [18].

Швидкість вітру на висоті 8 м:

$$V = V_{10} \cdot \left(\frac{H_8}{H_{10}} \right)^{\frac{1}{5}} = 5,5 \cdot \left(\frac{8}{10} \right)^{\frac{1}{5}} \approx 5,26 \text{ м/с}$$

Виконаємо розрахунок річного виробітку енергії вітроагрегатом S.A.V потужністю 5 кВт. Результати занесемо до таблиці 3. Для визначення метеорологічних даних скористаємось [21]. В табл. 2 наведено середні величини ймовірності середньорічної швидкості вітру по градаціях для регіонів України.

Таблиця 2. Середні величини ймовірності швидкості вітру по градаціях (% від загальної кількості випадків) [21]

Регіон	Швидкість вітру, м/с					
	4-5	6-7	8-9	10-11	12-13	14-15
Донецьк (Жданов АМСГ)	20,8	15,3	7,8	5,4	5,5	4,2
Херсон (Агрометеостанція)	24,1	14,1	6,6	2,6	2,6	0,6
Дніпро (АМСГ)	22,3	12,7	8,1	2,7	1,7	0,6
Львів (АМСГ)	21,8	13,4	5,5	2,1	1,7	0,8

Таким чином, за нормальних кліматичних умов, при використанні БЕУ SAV 5 кВт на протязі року можливо отримати 6,8 МВт.год електроенергії. У разі дефіциту потужності БЕУ, як було встановлено вище,

на час до встановлення оптимальної швидкості вітру живлення навантаження відбувається від АКБ. Якщо за час роботи акумуляторів швидкість вітру не відновиться до необхідного рівня, в роботу включається дизельний двигун.

В табл. 3: V , м/с – середина градації швидкості вітру; V_8 , м/с – середина градації швидкості вітру на висоті 8 м; P , кВт – потужність, яку розвиває БЕУ; E , в.о. – повторюваність градацій швидкості вітру; T , год – час роботи БЕУ на протязі року; W , кВт.год – вироблена електроенергія.

Таблиця 3. Максимально можлива річна виробка енергії вітроагрегатом S.A.V 5 кВт для умов Дніпровського регіону

V , м/с	V_8 , м/с	P , кВт	E , в.о.	T , год	W , кВт.год
2,5	2,39	0,05	25,200	700	35,44
4,5	4,30	0,30	26,000	850	250,97
6,5	6,22	0,89	22,300	920	818,65
8,5	8,13	1,99	12,700	790	1572,01
10,5	10,04	3,75	8,100	400	1500,37
12,5	11,95	5,5	2,700	280	1540,00
14,5	13,87	5,5	1,700	120	660,0 0
16,5	15,78	5,5	0,600	50	275,00
18,5	17,69	5,5	0,600	20	110,00
>20	19,13	5,5	0,100	7	38,50
			Всього	4137	6800,95

V. ВИСНОВКИ

Використання автономних комбінованих систем резервного живлення на території України дозволить зменшити антропогенний вплив на навколишнє середовище та реалізувати потенціал місцевих ресурсів ВДЕ.

КМС, яка представлена в роботі, є мобільною (пересувною), що дає змогу використовувати її у віддалених регіонах та важкодоступній місцевості, в залежності від потреб споживачів, таких як радіолокаційні установки, геологорозвідні пристрої невеликої потужності, тощо. Також, названі споживачі матимуть змогу працювати в місцевості, де живлення від загальної системи електропостачання є технічно неможливим або економічно недоцільним.

Комбінація відновлюваних та традиційних джерел живлення для запропонованої системи дозволяє забезпечити безперебійне постачання електроенергії для малопотужних пристроїв на досить тривалий час.

В роботі представлено блок-схему управління системою КМС, яка передбачає, що за рахунок вста-

новлених датчиків, можливі фактори нестачі електроенергії для живлення споживачів та додає системі автономності. Таким датчиком може служити звичайний ватметр або лічильник електроенергії, який передає дані до пристрою контролю.

Подальша розробка КМС, на відміну від резервної системи електроживлення з двома електрогенераторами, дозволить знизити як капітальні, так і експлуатаційні витрати на її використання.

Запропонована система та спосіб її керування представляють практичний та науковий інтерес та мають бути досліджені в майбутньому з метою їх вдосконалення.

СПИСОК ЛІТУРАТУРИ

- [1] Shcrabets, F. P. The Systems of Backup Power Supply Based on Renewable Energy Sources for Mobile Facilities [Text] / F. P. Shcrabets, P.Yu. Krasovskyi, V.V. Berdnyk // Scientific Bulletin of National Mining University. – 2017. – No 2. – P. 81-86.
- [2] Сандлер, А.С. Преобразователи частоты для управления асинхронными двигателями [Текст] / А.С. Сандлер, Р.С. Сарбатов. – М. – Л.: Энергия, 1966. – 144 с.
- [3] Kannan, N. Solar Energy for Future World: A Review [Text] / N. Kannan, D. Vakeesan // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2016. – Vol. 62. – P. 1092-1105.
- [4] Kaldellis, J.K. Overview of Stand-Alone and Hybrid Wind Energy Systems [Text] / J.K. Kaldellis. – Woodhead Publishing Limited. – 2010. – P. 1 – 27
- [5] Alone and Hybrid Wind Energy Systems [Text] / J.K. Kaldellis. – Woodhead Publishing Limited. – 2010. – P. 102-161.
- [6] Bhuvaneswari, G. Hybrid Wind-Diesel Energy System [Text] / G. Bhuvaneswari, R. Balasubramanian. – Woodhead Publishing Limited. – 2010. – P. 191-215.
- [7] Philip, S. Off-grid solar photovoltaic systems for rural electrification and emissions mitigation in India [Text] / S. Philip, F. Samuel. – Solar Energy Materials and Solar Cells. – 2016. – P. 147-156
- [8] Philip, S. What are the greatest opportunities for PV to contribute to rural development? [Text] / S.Philip, E. Ned. – Energy Procedia. – 2017. – P.139-146
- [9] Salas, V. Review of the maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems [Text] / V. Salas, E. Olias. – Solar Energy Materials and Solar Cells. – 2006. – P. 1555-1578
- [10] Salas, V. Overview of the off-grid photovoltaic diesel batteries systems with AC loads [Text] / V. Salas, W Suponthana. – Applied Energy. – 2015. – P. 195-216
- [11] Joydip, J. A review of inverter topologies for single-phase grid-connected photovoltaic systems [Text] / J. Joydip, H. Saha. Renewable and Sustainable Energy

Reviews, 2017. – 1256-1270

- [12] Sechilariu, M. Building Integrated Photovoltaic System With Energy Storage and Smart Grid Communication [Text] / M. Sechilariu, B. Wang. IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2013. – P. 1607-1618
- [13] Wang, B. Intelligent DC microgrid with smart grid communications: Control strategy consideration and design [Text] / B. Wang, F. Locment. IEEE Transactions on Smart Grid. – 2012. – 2148-2156
- [14] Mohandes, M. Support vector machines for wind speed prediction [Text] / M. Mohandes, T. Halawani. Renewable Energy. – 2004. – 939-947.
- [15] Шефтер, Я. Изобретателю о ветродвигателях и ветроустановках [Текст] / Я. Шефтер, И. Рождественский И. М.: Изд-во министерства сельского хозяйства. – 1957. – 145 с.
- [16] Nacfaire, H. Wind-Diesel and Wind Autonomous Energy Systems [Text] / H. Nacfaire. Elsevier applied science London and New York. – 2005. – P. 200-218.
- [17] Абрамович, Б. Выбор параметров ветродизельной установки для энергообеспечения минерально-сырьевого комплекса [Текст] / Б. Абрамович, А. Бельский // Записки Горного института. – 2012. – Т.195. – С. 227-230.
- [18] Кривцов, В.С. Невичерпна енергія [Текст] / В.С. Кривцов, О.І. Яковлев, О.М. Олейников // Книга 1: Вітроелектрогенератори. – Харків: Нац. аерокосм. ун-т «Харк. авіац. ін-т», Севастополь: Севаст. нац. техн. ун-т. – 2004. – 396 с.
- [19] Грахов, Ю. Инженерный метод и математическое моделирование в проектировании ветроэнергетических установок [Текст] / Ю. Грахов, О. Матвеев, Е. Соломин // Вестник ЮУрГУ. – 2010. – Вып.9. – С. 45-52.
- [20] Харитонов, В.П. Автономные ветроэлектрические установки [Текст] / В.П. Харитонов. – М.: ГНУ ВИЭСХ. – 2006. – 280 с.
- [21] Егорова А. С. Справочник по климату СССР [Текст] / А. С. Егорова. – Л.: Гидрометиздат. – 1967. – Вып.10. – 305 с.

Стаття надійшла до редакції 08.07.2018

КОМБИНИРОВАННАЯ МОБИЛЬНАЯ СИСТЕМА ОСНОВНОГО И РЕЗЕРВНОГО ПИТАНИЯ ЭЛЕКТРОПОТРЕБИТЕЛЕЙ МАЛОЙ И СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ

ШКРАБЕЦ Ф.П.

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой возобновляемых источников энергии Национального технического университета “Днепропетровская политехника”, Днепр, Украина, e-mail, ShcrabetsF@nmu.org.ua;

БЕРДНИК В.В.

аспирант кафедры возобновляемых источников энергии Национального технического университета “Днепропетровская политехника”, Днепр, Украина, e-mail, Berdnik.V.V@nmu.one.

Цель. Цель работы заключается в разработке мобильной комбинированной системы основного и резервного питания на основе возобновляемых и традиционных источников энергии для электропитания маломощных потребителей в отдаленных от общей электросети регионах; в описании конструкции предложенной системы; в разработке блок-схемы алгоритма контроля и управления элементами системы для достижения наиболее эффективного энергопитания потребителей при дальнейшем внедрении и совершенствовании системы.

Методы исследования. Для проведения исследований использованы: метод аналитической обработки обзорных материалов по вопросу состояния развития альтернативной энергетики на современном этапе и существующих сегодня проблем, связанных с энергообеспечением маломощных отдаленных энергоустановок, а также путей решения обозначенных проблем за счет моделирования возможных систем бесперебойного питания; метод системного анализа комплексной оценки потенциала комбинированной мобильной системы основного и резервного питания на основе современных компьютерных технологий.

Полученные результаты. Выявлена и доказана целесообразность создания и дальнейшего совершенствования систем комбинированного электропитания маломощных потребителей с целью обеспечения энергобаланса Днепропетровского региона (Украина). Предложен вариант конструкции комбинированной системы на основе традиционных и возобновляемых источников: в частности, разработана блок-схема алгоритма контроллера управления комбинированной системой. Определен механизм действия представленного алгоритма, а также получены и проанализированы графические зависимости: коэффициента мощности от величины быстроходности ветроагрегата $C_p=f(Z)$; механического момента ветротурбины от коэффициента быстроходности $M=f(Z)$. Представлены прогнозируемые результаты расчета выработки электроэнергии в течение года потенциальной ветроэлектростанцией W , [кВт·ч].

Научная новизна заключается в предложенной блок-схеме алгоритма контроля и управления комбинированной системой резервного электроснабжения, которая позволяет двигателям ветроустановки и дизельного агрегата попеременно работать на один общий электрогенератор.

Практическая ценность работы состоит в создании системы гарантированного энергообеспечения и распределения электроэнергии для маломощных потребителей энергии различного назначения; повышении эффективности, гибкости и надежности системы и, в конечном счете, уменьшении энергетической зависимости страны от импорта традиционных ископаемых энергоресурсов, преобразование которых приводит к негативным последствиям для экологии страны. Внедрение предложенной блок-схемы алгоритма контроля и управления комбинированной системой резервного электроснабжения позволит снизить стоимость системы и затраты на ее обслуживание, например, текущий ремонт и тому подобное.

Ключевые слова: резервное электроснабжение; энергопотребление; возобновляемые источники энергии; комбинированная система; ветроэлектрогенератор; двигатель; дизельный агрегат; мощность; блок-схема; мобильность; эффективность; зависимость.

COMBINED MOBILE POWER SYSTEM FOR THE STANDBY POWER SUPPLY OF THE LOW AND AVERAGE ELECTRICAL FACILITIES

SHKRABETS F.P. Sci.D, Professor, the head of the renewable sources of energy department of National technical university "Dnipro Polytechnic", Dnipro, Ukraine, e-mail, ShcrabetsF@nmu.org.ua;

BERDNYK V.V. Postgraduate student, renewable sources of energy department of National technical university "Dnipro Polytechnic", Dnipro, Ukraine, e-mail, Berdnik.V.V@nmu.one.

Purpose. The objective of research is to develop a version of combined mobile system of the main and backup power supply based on renewable and traditional energy sources for low-power consumers in regions distant from the main electricity grid; to describe the design of the proposed system; to develop a block diagram of the control and management algorithm for the system elements aimed at achieving more efficient energy supply to consumers in case of further implementation of the system.

Methodology. To attain the research objective, the following methods have been employed: the method of analytical processing of the reviewed materials on current state of alternative energetics, on problems related to energy supply for low-power remote consumers, and on ways of solving the problems identified by means of simulating potential uninterruptible power systems; the method of system analysis of complex estimation based on modern computer technologies as for the combined mobile system of the main and backup power supply potential.

The results obtained. The expediency of development and further improvement of such combined power supply systems intended for low-power consumers with the purpose of providing the energy balance in the Dnipro region (Ukraine) has been revealed and proved. A version of the combined system based on traditional and renewable sources of power is proposed and described. The block diagram of the combined system controller algorithm is developed. The mechanism of action of the presented algorithm is determined, as well as the graphical dependences of the power factor on the speed of the wind turbine $C_P=f(Z)$, and of mechanical torque of the wind turbine on the coefficient of its speed $M=f(Z)$ are obtained and analyzed. The results of calculation as for electric power generated by potential wind power plant W , [kWh] during the year are presented.

Scientific novelty consists in the proposed block diagram of the control and management algorithm as regards the combined backup power supply system, that allows wind turbine engines and diesel units to alternately operate on a single generating unit.

The practical value of study is further development of the system which provides guaranteed uninterruptible energy supply and distribution of electric energy intended for low-power energy consumers to satisfy their needs; increasing the efficiency, flexibility and reliability of the system and, ultimately, reducing the energy dependence of the country on the import of traditional fossil energy resources, the conversion of which leads to negative consequences for the country's ecology. The implementation of the proposed block diagram of the control and management algorithm will reduce the cost of the system and the cost of its maintenance, for example, current repairs, etc.

Keywords: backup power supply; energy consumption; renewable energy sources; combined system; wind turbine generator; engine; diesel unit; power; block diagram; mobility; efficiency; dependence.

REFERENCES

[1] Shcrabets, F. P., Krasovskyi, P.Yu., & Berdnyk, V.V.

(2017). The Systems of Backup Power Supply Based on Renewable Energy Sources for Mobile Facilities. Scientific Bulletin of National Mining University,

- 2017, 2, 81-86.
- [2] Sandler, A.S., Sarbatov, R.S. (1966). Preobrazovateli chastoty dlya upravleniya asinkhronnymi dvigatelyami [Frequency Converters for the Control of Asynchronous Motors]. M. – L.: Energiya, 144. (in Russian)
- [3] Kannan, N. & Vakeesan, D. (2016). Solar Energy for Future World: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 1092-1105.
- [4] Kaldellis, J.K. (2010). Overview of Stand-Alone and Hybrid Wind Energy Systems. *Woodhead Publishing Limited*, 2010, 1, 27.
- [5] Kaldellis, J.K. (2010). Feasibility Assessment for Stand-Alone and Hybrid Wind Energy Systems. *Woodhead Publishing Limited*, 102, 61.
- [6] Bhuvaneswari, G. & Balasubramanian, R. (2010). Hybrid Wind-Diesel Energy System. *Woodhead Publishing Limited*, 1, 191-215.
- [7] Philip, S. & Samuel, F. (2016). Off-grid solar photovoltaic systems for rural electrification and emissions mitigation in India. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 1, 147-156.
- [8] Philip, S. & Ned, E. (2017). What are the greatest opportunities for PV to contribute to rural development? *Energy Procedia*, 1, 139-146.
- [9] Salas, V. & Olias, E. (2006). Review of the maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2, 555-1578.
- [10] Salas, V. & Suponthana, W. (2015). Overview of the off-grid photovoltaic diesel batteries systems with AC loads. *Applied Energy*, 2, 195-216.
- [11] Joydip, J. & Saha, H. (2017). A review of inverter topologies for single-phase grid-connected photovoltaic systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2, 1256-1270.
- [12] Sechilariu, M. & Wang, B. (2013). Building Integrated Photovoltaic System with Energy Storage and Smart Grid Communication. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2, 1607-1618.
- [13] Wang, B. & Locment, F. (2012). Intelligent DC microgrid with smart grid communications: Control strategy consideration and design. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2, 2148-2156.
- [14] Mohandes, M. & Halawani, T. (2004). Support vector machines for wind speed prediction. *Renewable Energy*, 2, 939 – 947.
- [15] Shefter, YA., Rozhdestvenskiy, I. (1957). Izobretatelyu o vetrodvigatelyakh i vetroustanovkakh [To the Inventor about Windmills and Wind Turbines]. M. Izdatel'stvo ministerstva sel'skogo khozyaystva, 145. (in Russian)
- [16] Nacfaire, H. (2005). Wind-Diesel and Wind Autonomous Energy Systems. *Elsevier applied science London and New York*, 2, 200-18.
- [17] Abramovich, B., Bel'skiy, A. (2012). Vybor parametrov vetrodizel'noy ustanovki dlya energoobespecheniya mineral'no-syr'yevogo kompleksa [Selection of Parameters of a Wind-Diesel Plant for Energy Supply of a Mineral-Raw Complex]. *Zapiski Gornogo instituta*, 195, 227-230. (in Russian)
- [18] Grakhov, Yu., Matveyenko O., Solomin, Ye. (2010). Inzhenernyy metod i matematicheskoye modelirovaniye v proyektirovanii vetroenergeticheskikh ustanovok [Engineering Method and Mathematical Modeling in the Design of Wind Power Plants]. *Vestnik YUUrGU*, 9, 45-52. (in Russian)
- [19] Kharitonov, V.P. (2006). Avtonomnyye vetroelektricheskiye ustanovki [Autonomous Wind Power Plants]. M. *GNU VIESKH*, 280. (in Russian)
- [20] Yegorova, A.S. (1967). Spravochnik po klimatu SSSR [Handbook on the Climate of the USSR]. L. *Gidrometizdat*, 305. (in Russian)
- [21] Krivtsov, V.S., Yakovlev, O.I., Oleinikov, O.M. (2004). Nevicherpna yenergiya [Inexhaustible Energy]. Kniga 1: Vítroyelektrogeneratori [Book 1: Wind-driven generators]. *National Aerocsm. University "Kharkiv. aviat. institute", Kharkiv; Sevast. National. Tech. University, Sevastopol*, 396. (in Ukrainian)