

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ "ЗАПОРІЗЬКА ПОЛІТЕХНІКА"

---



*Науковий журнал*

# ЕЛЕКТРОТЕХНІКА та ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА

№1'2022

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

*Виходить 4 рази на рік*

Запоріжжя

2022

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

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

ЗАКОРДОННІ ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ  
КОЛЕГІЇ

ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ (Україна)

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

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

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

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

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

Видавець: Національний університет "Запорізька політехніка", м. Запоріжжя. Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК №6952 від 22.10.2019р.  
Реєстрація журналу: Журнал зареєстровано у Міністерстві юстиції України. Свідоцтво про державну реєстрацію КВ №24219-14059 ПР від 07.11.2019р.  
Адреса редакції: Редакційно-видавничий відділ. національний університет "Запорізька політехніка", вул. Жуковського, 64, м. Запоріжжя, 69063, Україна. Телефон:+380(61)769-82-96 Факс: (061) 764-21-41 e-mail: rfvv@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 28.03.2022 за рекомендацією вченої ради національного університету "Запорізька політехніка" (протокол №6 від 24.03.2022 р.). Формат 60x84/8. Ум. Др. Арк. 6,74. Тираж 300 прим. Зам. №254.

ZAPORIZHZHIA POLYTECHNIC NATIONAL UNIVERSITY

---



*Scientific journal*

# **ELECTRICAL ENGINEERING & POWER ENGINEERING**

**№1'2022**

*Founded by Zaporizhzhia Polytechnic National University in May 1999*

*4 issues per year*

Zaporizhzhia

2022

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

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

FOREIGN MEMBERS OF EDITORIAL BOARD

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

MEMBERS OF EDITORIAL BOARD (Ukraine)

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

*The journal included in the international scientometric databases, catalogs and search systems: Index Copernicus; CrossRef; Directory of Open Access Journals (DOAJ); Google Academy; OpenAIRE; Public Knowledge Project (PKP); ResearchBib - Academic 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; 3. Automation and computer integrated technologies.

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

Founder and editor: Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia. Certificate of publisher Civil Code №6952 dated October 22, 2019.  
Journal was registered: by the Ministry of Justice of Ukraine. Registration number KV № 24219-14059 PR dated November 7, 2019.  
Address of editor and editorial office: Zaporizhzhia Polytechnic National University, st. Zhukovsky, 64, Zaporozhia, 69063, Ukraine. Phone: +380(61)769-82-96 Fax: (061) 764-21-41 e-mail: rvv@zntu.edu.ua.  
**E-address:** http://ee.zntu.edu.ua; **E-mail:** etae@ukr.net

Computer layout Dyachenko O.O. Editor of English texts Voitenko S.V. The journal was signed on May 28, 2022 on the recommendation of the academic council of the Zaporizhzhia Polytechnic National University (Protocol No.6 dated may 24, 2022). Sheet size 60x84/8. Cond. Print. Sheets 6,74. Number of copies printed 300. Rep. №254.

# ЗМІСТ

## I ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

*Коваленко М.А., Коваленко І.Я., Головка В.М., Чумак В.В., Святненко В.А.*  
Експериментальна оцінка корекції потужності генератора автономної  
вітроелектроустановки..... 8

*Рева І.В., Тодоров О.В., Беззуб М.А.*  
Застосування нейронної мережі для визначення параметрів схеми заміщення  
трансформатора в умовах неінвазійного моніторингу..... 19

## II ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА

*Рева І.В., Бялобржеський О.В., Тодоров О.В., Беззуб М.А.*  
Огляд електричних Методів та систем моніторингу силових трансформаторів  
в середовищі SMART GRID .....30

*Прокуда В.М., Буртний Д.І.*  
Шляхи аналізу електроспоживання магістрального конвеєрного транспорту.....42

## III АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ

*Заблодський М.М., Сподоба М.О., Сподоба О.О.*  
Експериментальне дослідження витрати енергії на процес початкового нагріву  
субстрату за використання електротепломеханічної системи..... 49

# CONTENTS

## I ELECTRICAL ENGINEERING

*Kovalenko M.A., Kovalenko I.Y., Golovko V.M., Chumack V.V., Svyatnenko V.A.*  
Experimental evaluation of generator power correction of an autonomous wind electrical installations.....8

*Reva I.V., Todorov O.V., Bezzub M.A.*  
Application of a neural network for determining the parameters of a transformer elimination circuit under the conditions of non-invasive monitoring .....19

## II POWER ENGINEERING

*Reva I.V., Bialobrzheskyi O.V., Todorov O.V., Bezzub M.A.*  
Review of electric methods and systems for monitoring power transformers in the SMART GRID environment .....30

*Prokuda V.N., Burtnyi D.I.*  
Ways of analysis of electric consumption of main conveyor transport.....42

## III AUTOMATION AND COMPUTER INTEGRATED TECHNOLOGIES

*Zablodskiy N.N., Spodoba M.O., Spodoba A.O.*  
Experimental investigation of energy consumption for the process of initial heating of a substrate for the use of electric heat-mechanical system..... 49

# СОДЕРЖАНИЕ

## I ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

*Коваленко М.А., Коваленко И.Я., Головки В.М., Чумак В.В., Святненко В.А.*  
Экспериментальная оценка коррекции мощности генератора автономной ветроэлектростанции.....8

*Рева И.В., Тодоров О.В., Беззуб М.А.*  
Применение нейронной сети для определения параметров схемы замещения трансформатора в условиях неинвазивного мониторинга.....19

## II ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

*Рева И.В., Бялобржеский О.В., Тодоров О.В., Беззуб М.А.*  
Обзор электрических методов и систем мониторинга силового трансформатора в среде SMART GRID.....30

*Прокуда В.Н., Буртный Д.И.*  
Пути анализа электропотребления магистрального конвейерного транспорта.....42

## III АВТОМАТИЗАЦИЯ И КОМПЬЮТЕРНО-ИНТЕГРИРОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

*Заблудский Н.Н., Сподоба М.А., Сподоба А.А.*  
Экспериментальное исследование расхода энергии на процесс начального нагрева субстрата за использование электротепломеханической системы.....49

УДК 621.313.84

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ОЦІНКА КОРЕКЦІЇ ПОТУЖНОСТІ ГЕНЕРАТОРА АВТОНОМНОЇ ВІТРОЕЛЕКТРОУСТАНОВКИ

- КОВАЛЕНКО М.А. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електромеханіки національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” Київ, Україна, e-mail: kovalenko\_ma@i.ua;
- КОВАЛЕНКО І.Я. аспірант кафедри відновлювальних джерел енергії національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” Київ, Україна, e-mail: 2048141@ukr.net;
- ГОЛОВКО В.М. доктор технічних наук, професор, професор кафедри відновлювальних джерел енергії національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” Київ, Україна, e-mail: golovkovm@ukr.net;
- ЧУМАК В.В. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електромеханіки національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” Київ, Україна, e-mail: chumack\_kri@ukr.net;
- СВЯТНЕНКО В.А. старший викладач, кафедра теоретичної електротехніки національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” Київ, Україна, e-mail: vadiksv@gmail.com.

**Мета роботи.** Провести оцінку ефективності регулювання вихідної активної потужності магнітоелектричного генератора у складі автономної вітроелектроустановки.

**Методи дослідження.** Аналіз існуючих методів корегування вихідних параметрів генераторів. Методи експериментального дослідження електрогенераторів. Чисельні методи обробки отриманих результатів.

**Отримані результати.** Розроблено експериментальний стенд для дослідження параметрів та характеристик автономного магнітоелектричного генератора у складі вітроелектроустановки з метою оцінки ефективності корекції вихідної потужності генератора. Проведено експериментальні дослідження магнітоелектричного генератора в режимі холостого ходу для двох випадків: характеристика холостого ходу при підмагнічуванні із застосуванням сторонньої ємності; характеристика холостого ходу при підмагнічуванні додатковою обмоткою (при подачі постійного струму). В даному досліді вихідна напруга збільшується від 26% (при швидкості обертання 200 об/хв) до 47% (при швидкості обертання 780 об/хв). Дослідження показали що використання методу корекції вихідної потужності шляхом присєднання додаткової ємності до обмотки якоря генератора є менш ефективним методом регулювання потужності ніж використання підмагнічування додатковою обмоткою. Проведено серію експериментальних досліджень генератора у складі автономної вітроустановки за різного значення активного навантаження та за різних методів корекції вихідної потужності. При цьому проведено наступні дослідження: дослідження ефективності використання обмотки підмагнічування при постійному активному навантаженні та за різної швидкості обертання (різної швидкості вітру); дослідження ефективності використання обмотки підмагнічування при підтримці постійної напруги на затискачах генератора 14,4 В. Глибина регулювання вихідної потужності залежить від швидкості обертання ротора вітроустановки і за результатами експериментальних досліджень, для навантаження  $I=0,8$  А становить: 1,4% при 350 об/хв; 12,5% при 550 об/хв; 15,3% при 650 об/хв; 22,12% при 750 об/хв. Більш ефективним методом є використання додаткової підмагнічувальної обмотки. Проведено порівняльний аналіз вихідних параметрів магнітоелектричного електрогенератора отриманих шляхом експериментальних досліджень та імітаційного чисельного моделювання. Порівняння результатів моделювання з результатами експериментальних досліджень показують схожість отриманих результатів в межах 7-10%, що підтверджує адекватність розроблених моделей та достовірність отриманих результатів.

**Наукова новизна.** Шляхом експериментальних досліджень магнітоелектричного генератора встановлено межі корекції вихідної потужності генератора у складі автономної вітроелектроустановки.

**Практична цінність.** Розроблено експериментальний стенд для дослідження магнітоелектричного генератора з осевим магнітним потоком для імітації його роботи у складі автономної вітроелектроустановки.

**Ключові слова:** експериментальне дослідження; магнітоелектричний генератор; автономна вітроелектроустановка; корекція вихідної потужності; межі регулювання.



## I. ВСТУП

Перетворення механічної енергії вітру в електричну є актуальним науково-практичним завданням. Одним фіз. Прикладом таких систем є вітроелектроустановки, що перетворюють механічну енергію вітру в електричну. До складу такої системи входить ротор вітроустановки, що представляє собою вітрове колесо певного конструктивного виконання, редуктор та електрогенератор. Відомо, що механічна характеристика ротора вітроелектроустановки має нелінійний характер із явно вираженими максимумами активної потужності за різного значення швидкості вітру.

Традиційні вітроелектроустановки із мультиплікатором та без нього працюють на довільній точці механічної характеристики ротора вітроустановки при зміні навантаження та при зміні швидкості вітру. Для вітроелектроустановок із мультиплікатором використовуються класичні електрогенератори із постійними магнітами та радіальним основним магнітним потоком. Для безмультиплікаторних систем рекомендується використовувати електрогенератори із осьовим магнітним потоком. Вони мають ряд переваг в таких системах, що детально описано в літературних джерелах [1], [16].

Авторами в попередніх роботах [2], [3] проведено низку імітаційних чисельних моделювань вітроелектроустановки у складі із генератором із постійними магнітами. Попередні результати показують досить високу ефективність використання підмагнічування додатковою ємністю обмотки якоря генератора та використання підмагнічування додатковою обмоткою магнітоелектричного генератора. Використання додаткової ємності дозволяє підвищити величину вихідної активної потужності генератора на  $\approx 7-16\%$ . При підмагнічуванні додатковою обмоткою ефект підвищення активної потужності генератора складає  $\approx 32-35\%$ .

## II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

В роботі [4] автори представляють дослідження синхронного генератора із постійними магнітами із осьовим магнітним потоком. Конструкція генератора побудована із використанням модифікованої версії багатогольового еволюційного алгоритму без домінуючого сортування генетичного алгоритму [10]. Оскільки процедура проектування корелює з розмірними та електромагнітними параметрами, можуть виникати невизначеності, що знижують ефективність генератора через неточності в конструкції та в розрахунках поля. Крім того, результати експериментальних досліджень показані нечітко, без опису необхідного обладнання та програми випробувань, що ставить під сумнів адекватність результатів.

У роботі [5] представлено дослідження нової синхронної машини зі збудженням від постійних магнітів та підмагнічування додатковою обмоткою за допомогою тривимірного скінченно-елементного аналі-

зу та експериментальних досліджень. Показано, що генератор справді здатен регулювати електромагнітне поле. У роботі показано принцип роботи та особливості конструкції цього генератора оригінальної конструкції. Також проводиться порівняння результатів тривимірного моделювання з експериментальним дослідженням, проведеним на прототипі, що має іншу конструкцію ротора [11]. Відповідно, результати таких досліджень важко використати та будувати на їх основі подібну концепцію.

В роботі [6] авторами представлено порівняння експериментальних та розрахункових даних малогабаритних генераторів із постійними магнітами. Недоліком запропонованої системи є підвищена вартість і складність системи, піддається сумніву і надійність таких систем. Завдання регулювання зовнішніх параметрів автори в роботі [7] вирішують за допомогою складної математичної моделі, обчислювальної машини з подальшим контролем поля якоря досліджуваного зразка. Порівняння розроблених моделей (які є програмним забезпеченням системи) з результатами експериментів показують досить високу збіжність.

У роботі [8], [9] розглядається синхронна машина з паралельним гібридним збудженням. Автори досліджують структурну топологію та принципи роботи гібридної машини збудження. Можливість управління потоком в умовах розімкненого ланцюга та результати розроблених моделей підтвержені порівнянням з експериментальними вимірами [12], [14]. У роботі наведено порівняння різних підходів до розрахунку магнітної системи гібридних машин із експериментальними даними. Однак, у роботі відсутні висновки щодо ефективності роботи досліджуваного генератора та похибки представлених методів розрахунку магнітної системи.

Узагальнюючи результати літературного пошуку можливо зробити висновок, що основна мета наукових досліджень в даному напрямку полягає в стабілізації вихідної напруги досліджуваних магнітоелектричних генераторів, однак зовсім не приділяється увага можливості регулювання вихідної потужності [15].

Тому актуальним науково-практичним завданням є оцінка ефективності корекції вихідної потужності магнітоелектричного генератора експериментальним методом із подальшим порівнянням отриманих результатів із результатами моделювання. Оскільки саме величина корисної активної потужності, яку можливо акумулювати в результаті процесу перетворення механічної енергії вітру в електричну, є бажаною величиною для вітрогенеруючих систем.

## III. МЕТА РОБОТИ

Метою роботи є експериментальна перевірка результатів, що отримані при математичному та імітаційному моделюванні роботи генератора вітроустановки торцевого типу із збудженням від постійних магнітів та додатковою підмагнічувальною обмоткою для

оцінки ефективності корекції вихідної активної потужності автономної вітроелектроустановки. При цьому досліджувалися основні вихідні параметри та характеристики генератора: вихідна напруга; робочий струм якоря; вихідна активна потужність якоря генератора. Критерієм оцінки якості результатів є порівняння результатів експериментальних досліджень із результатами імітаційного математичного моделювання.

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

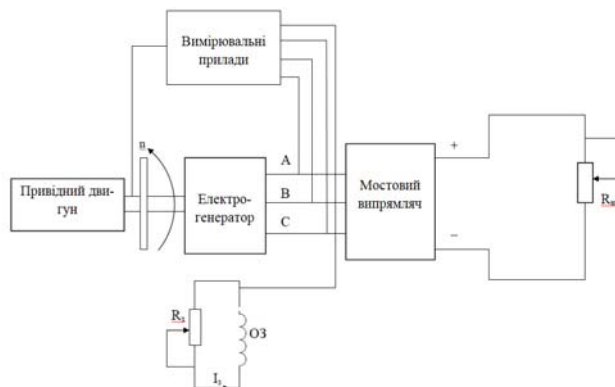
Експериментальні дослідження проведені із використанням виготовленого прототипу магнітоелектричного генератора із аксіальним магнітним потоком [1], [3], [9]. Порівняння результатів імітаційного моделювання та експериментальних досліджень проводиться із використанням параметрів електрогенератора, що наведені в табл. 1.

**Таблиця 1.** Основні параметри та характеристики досліджуваного генератора

№	Параметр	Величина	Одиниці виміру
1	Повна номінальна потужність	50,0	В·А
2	Номінальна фазна напруга генератора	24,0	В
3	Число фаз	3	–
4	Синхронна частота обертання	750,0	об/хв
5	Кількість пар полюсів	4	–
6	Постійні магніти	NdFeB N38H: B <sub>r</sub> =1,21 Тл, H <sub>c</sub> =939 кА	–
7	Розрахунковий коефіцієнт потужності	0,9	–
8	Величина осьового повітряного проміжку	0,5	мм
9	Розрахунковий ККД	82	%
10	Середнє значення магнітної індукції в повітряному проміжку	0,21	Тл
11	Активний фазний опір обмотки якоря генератора	8,8	Ом
12	Індуктивність фази обмотки якоря генератора	0,022	Гн

Для проведення достовірних експериментальних досліджень автономного електрогенератора необхідно провести розробку структурної схеми експериментального стенду. Головним критерієм при розробці такого стенду є простота його конструкції, доступність

та невисока вартість основних його складових, універсальність, широкий діапазон зміни швидкості обертання привідного двигуна, точність вимірювальних приладів. Структурна схема розробленого експериментального стенду показано на рис. 1.



**Рисунок 1.** Структурна схема експериментального стенду

До складу стенду входить: привідний двигун постійного струму із незалежним збудженням (типу 2ПБ 90L); цифровий вимірювач швидкості обертання вала ротора генератора (CF5135C-Z); трифазний торцевий магнітоелектричний генератор; комплект вимірювальних приладів, що здійснюють контроль електричних параметрів генератора, привідного двигуна, навантаження та додаткової обмотки, що підмагнічує (TENSE, DJ-A96T; DC 0-100V 10A 1000Вт Deekrobot); трифазного мостового випрямляча; навантаження; комплекту ємностей, що впливають на процес підмагнічування; систему керування струмом збудження привідного двигуна та додатковою підмагнічувальною обмоткою.

Загальний вигляд розробленого експериментального стенду із всіма його конструктивними елементами наведено на рис. 2.



**Рисунок 2.** Загальний вигляд експериментального стенду  
1 – торцевий генератор; 2 – привідний двигун; 3 – реостат регулювання збудження; 4 – комплект із випрямлячами та фільтрами; 5 – комплект приладів вимірювання в колі привідного двигуна; 6 – комплект приладів вимірювання торцевого генератора; 7 – навантаження торцевого генератора; 8 – вимірювач швидкості обертання торцевого генератора.

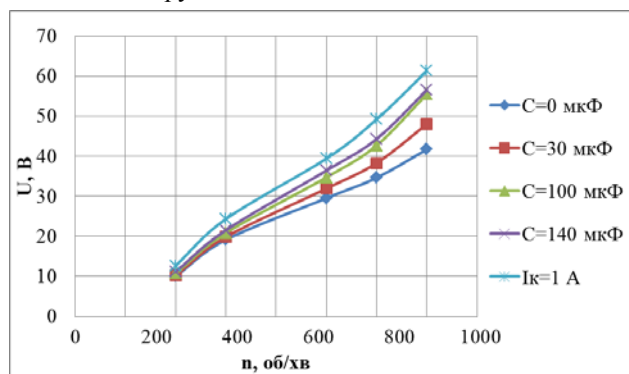
**Рисунок 2.** Загальний вигляд експериментального стенду

В якості випрямлячів використовуються мости Ларіонова для симетричного приєднання трифазного навантаження. Коригування та зміна швидкості обертання ротора генератора здійснювалось за допомогою двозонного регулювання напругою на якірній обмотці привідного двигуна постійного струму та струму його збудження. Як вимірювач швидкості обертання ротора використовується система, що працює на основі датчика Холла. Оскільки номінальна швидкість обертання генератора значно нижча від номінальної швидкості обертання привідного двигуна, передача механічного зусилля від привідного двигуна до генератора здійснюється за рахунок пасової передачі та системи шківів із передавальним числом 1:5.

Аналіз ефективності корекції вихідної потужності досліджуваного електрогенератора у складі вітроустановки починається із аналізу характеристики холостого ходу. Не дивлячись на те, що в роботі використовується генератор, в якому основний магнітний потік утворюється постійними магнітами, досліджувалось три режими роботи магнітоелектричного генератора в режимі холостого ходу:

- характеристика холостого ходу без регулювання;
- характеристика холостого ходу при підмагнічуванні із застосуванням сторонньої ємності;
- характеристика холостого ходу при підмагнічуванні додатковою обмоткою (при подачі постійного струму).

На рис. 3 наведено експериментальну характеристику холостого ходу генератора за різних значень швидкості обертання валу генератора, що імітує різну швидкість вітру.



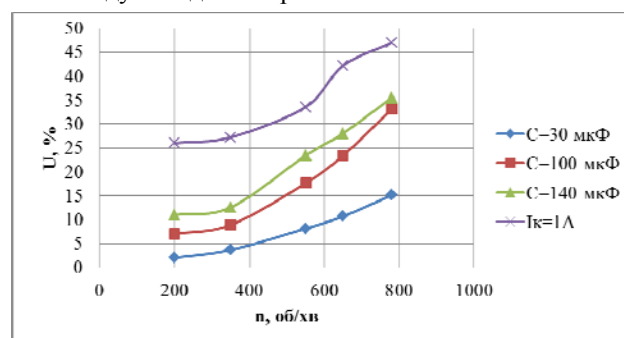
**Рисунок 3.** Характеристики холостого ходу генератора за різних значень швидкості обертання валу генератора

Очевидно, що характеристика генератора без регулювання має найнижчі значення величини вихідної напруги. При збільшенні швидкості обертання ротора генератора напруга на виході генератора збільшується лінійно (від 10 В до 42 В без регулювання) за рахунок збільшення ЕРС обертання, що наводиться в обмотці якоря генератора. При збільшенні величини підмагні-

чувальної ємності напруга починає зростати за рахунок збільшення основного магнітного потоку. Однак, при подальшому збільшенні величини підмагнічувальної ємності (при  $C > 100$  мкФ) напруга збільшується незначно, що пояснюється насиченням магнітної системи, збільшенням реактивного струму в обмотці якоря та падіння напруги на активному та індуктивному опорах.

При подачі постійної напруги на додаткову обмотку підмагнічування спостерігається збільшення величини вихідної напруги генератора, що пояснюється підсиленням основного магнітного потоку генератора. Даний дослід проводиться при вимкненій додаткової ємності.

Відносна зміна величини напруги в режимі холостого ходу наведена на рис. 4.

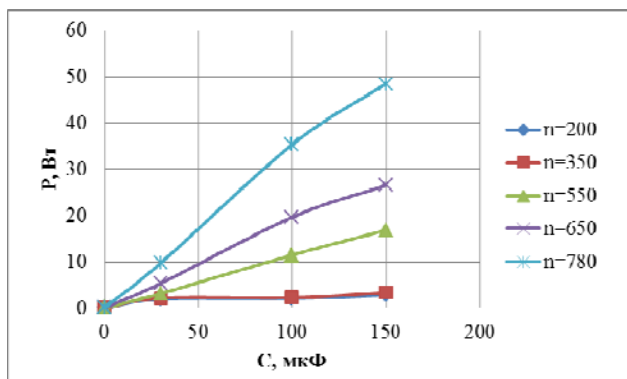


**Рисунок 4.** Відносна величина зміни напруги за холостого ходу

В залежності від способу підмагнічування (додатковою обмоткою чи приєднанням ємності) та швидкості обертання ротора генератора приріст вихідної напруги спостерігається від найменших 2% (при швидкості 200 об/хв та додаткової ємності  $C=30$  мкФ) до 47% (при швидкості 780 об/хв та подачі струму на додаткову обмотку  $I_k=1$  А). Кожен із розглянутих способів підвищує свою ефективність при збільшенні швидкості обертання ротора, що пояснюється збільшенням ЕРС, що наводиться в обмотці якоря генератора.

Найбільш ефективним, з точки зору максимального значення напруги в режимі холостого ходу, є підмагнічування генератора за допомогою додаткової обмотки. При цьому вихідна напруга збільшується від 26% (при швидкості обертання 200 об/хв) до 47% (при швидкості обертання 780 об/хв). Це пояснюється тим, що струм додаткової обмотки підмагнічування підсилює основний магнітний потік і не викликає в обмотці якоря на холостому ході додаткових електричних втрат (на активних та реактивних опорах).

Підмагнічування генератора сторонньою ємністю призводить до появи певного рівня активної потужності, що реєструється цифровим вимірювальним приладом. Це підтверджується відповідними результатами експериментальних досліджень, що показано на рис. 5.

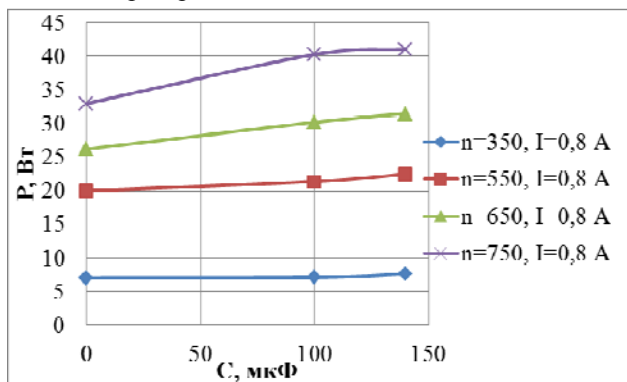


**Рисунок 5.** Потужність на затискачах генератора при підмагнічуванні сторонньою ємністю при холостому ході

За рис. 5 можливо зробити висновок: підмагнічування магнітоелектричного генератора сторонньою ємністю дійсно збільшує величину вихідної потужності генератора у складі вітроустановки та дозволяє керувати величиною вихідної потужності; підмагнічування генератора сторонньою ємністю у складі вітроустановки створює активне навантаження на валу вітроустановки навіть в режимі холостого ходу. Це можна віднести і до суттєвого недоліку такого методу корекції вихідної потужності.

Для оцінки ефективності корегування вихідної потужності досліджуваного генератора проведено серію експериментальних досліджень генератора при активному навантаженні: 0,2 А; 0,5 А та 1 А на кожну фазу.

На рис. 6 наведено експериментальну залежність вихідної потужності генератора при підмагнічуванні додатковою ємністю за різної швидкості обертання генератора: 350 об/хв, 550 об/хв, 650 об/хв та 750 об/хв. Дослід виконувався при постійному навантаженні генератора I=0,8 А.



**Рисунок 6.** Залежність вихідної потужності від величини приєднаної ємності

З рис. 6 можливо зробити висновок, що при збільшенні швидкості обертання  $\geq 350$  об/хв., аналогічно із попередніми навантаженнями, глибина регулювання залежить від швидкості обертання ротора вітроус-

тановки і за результатами експериментальних досліджень, для навантаження I=0,8 А становить: 1,4% при 350 об/хв; 12,5% при 550 об/хв; 15,3% при 650 об/хв; 22,12% при 750 об/хв. Отримані значення глибини регулювання менші значень, ніж при навантаженні I=0,5 А, що пояснюється збільшенням активних втрат в обмотці якоря генератора.

В табл. 2 наведено порівняння експериментальних значень глибини регулювання потужності генератора за різної величини активного навантаження генератора I=0,2 А; 0,5 А; 0,8 А.

**Таблиця 2.** Основні параметри та характеристики досліджуваного генератора

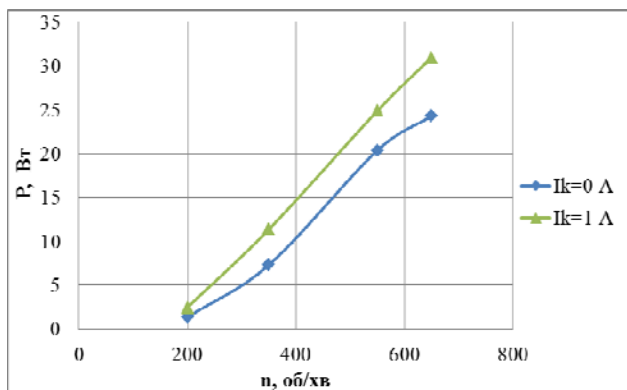
Навантаження, А	Глибина регулювання потужності, %			
	350 об/хв	550 об/хв	650 об/хв	750 об/хв
0,2	9,1	35,1	41,4	47
0,5	4,2	18,6	28,2	33,9
0,8	1,4	12,5	15,3	22,1

Отримані результати експериментальних досліджень дозволяють зробити висновок, що використання додаткової приєднаної ємності як регулятора вихідної потужності генератора дозволяє підвищити маневрувальні можливості вітроустановки. Однак, використання додаткових приєднаних конденсаторів збільшує навантаження на ротор вітроустановки, збільшує втрати в генераторі, зменшує його загальний ККД та дозволяє ступінчасте регулювання вихідних параметрів.

Програма експериментальних досліджень передбачає перевірку ефективності використання додаткової обмотки підмагнічування і включає в себе наступне:

- дослідження ефективності використання обмотки підмагнічування при постійному активному навантаженні та за різної швидкості обертання (різної швидкості вітру);
- дослідження ефективності використання обмотки підмагнічування при підтримці постійної напруги на затискачах генератора 14,4 В.

На рис. 7 показано результати експериментальних досліджень магнітоелектричного генератора при використанні обмотки підмагнічування при постійному активному навантаженні та різній швидкості обертання.

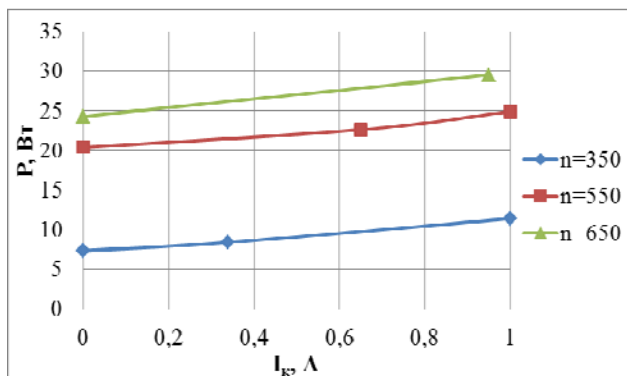


**Рисунок 7.** Залежність вихідної потужності від швидкості обертання при застосуванні обмотки підмагнічування

При проведенні дослідів, результати якого наведені на рис. 7, підтримувалась постійна величина струму в додатковій обмотці підмагнічування 1 А. При цьому вихідна напруга генератора змінювалась в широких межах. Струм в обмотці підмагнічування створює додаткову МРС, що направлена узгоджено із основним магнітним потоком, підсилює його і збільшує величину електромагнітного моменту та потужності. Це призводить до підвищення індукованої в обмотці якоря ЕРС та потужності на затискачах генератора. За рахунок цього вдається підвищити віддачу активної потужності в навантаження на: 44%, 35,5%, 18,07%, 21,6% при швидкості обертання 200 об/хв, 350 об/хв, 550 об/хв та 650 об/хв відповідно.

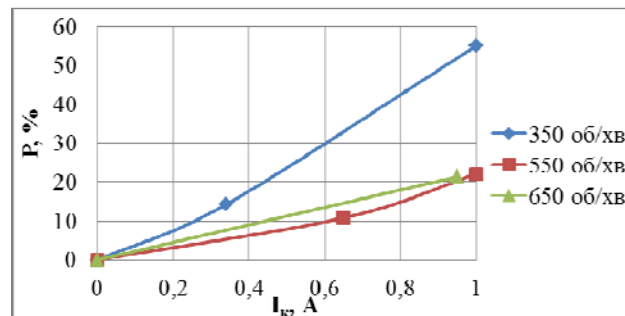
При збільшенні швидкості обертання збільшується величина потужності, струму в обмотці якоря, а отже і втрат в обмотці. Також збільшується вплив розмагнічуючої реакції якоря. Це призводить до зменшення глибини регулювання при збільшенні швидкості обертання ротора.

За підтримки постійної величини напруги на затискачах генератора (14,4 В), наприклад при живленні споживачів, для яких критичне стабільне значення вихідної напруги, залежність вихідної потужності від струму керування має вигляд, як наведено на рис. 8.



**Рисунок 8.** Залежність вихідної потужності від струму обмотки підмагнічування

Експериментальні дослідження, результати яких наведені на рис. 9, проводились для трьох значень швидкості обертання ротора, при цьому величина струму в обмотці змінювалась таким чином, щоб підтримувати  $U_1 = \text{const}$ .



**Рисунок 9.** Глибина регулювання потужності при  $U_1 = \text{const}$

З рис. 9 видно, що максимальна глибина регулювання вихідної потужності при  $U_1 = \text{const}$  досягається за швидкості обертання  $n=350$  об/хв і складає 55,1% та при струмі керування  $I_k=1$  А. При збільшенні швидкості обертання ротора генератора збільшуються втрати активної потужності на перемагнічування, механічні втрати та втрати в обмотці якоря. Тому при швидкостях обертання 550 об/хв та 650 об/хв глибина регулювання складає 22% та 21,4% відповідно при струмі додаткової обмотки  $I_k=1$  А.

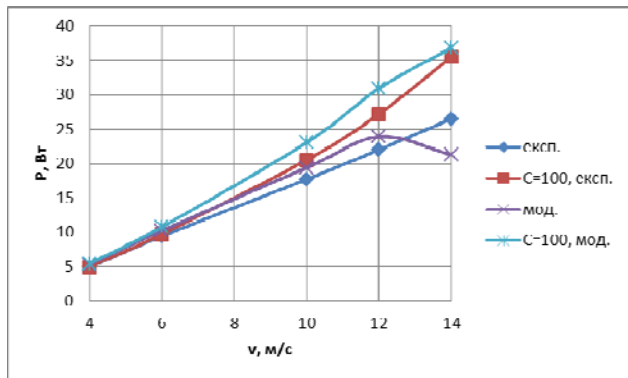
Навіть при підтримці постійної напруги  $U_1 = \text{const}$  на затискачах генератора вдається збільшити величину потужності, що приймається від ротора вітроустановки. При регулюванні струму додаткової обмотки за умови  $U_1=14,4$  В= $\text{const}$  збільшується вихідна потужність на затискачах генератора на 30% при 200 об/хв, 12,5% при 350 об/хв, 9,7% при 550 об/хв та 17,6% при 650 об/хв.

Використання додаткової обмотки підмагнічування для регулювання вихідної потужності системи вітроагрегат-електрогенератор є більш ефективним методом ніж використання конденсаторів.

Порівняння результатів експерименту із результатами імітаційного моделювання проводиться з метою підтвердження адекватності розроблених математичних моделей та визначення похибки отриманих результатів.

На рис. 10 показано залежність вихідної потужності генератора від швидкості вітру для двох випадків: без регулювання (природня характеристика); при приєднанні до обмотки якоря генератора додаткової ємності  $C=100$  мкФ.

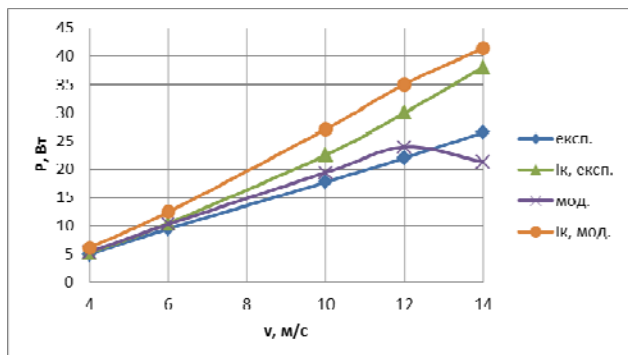




**Рисунок 10.** Залежність потужності від швидкості вітру при приєднанні додаткової ємності C=100 мкФ

По рис. 10 видно, що розбіжність між результатами імітаційного моделювання та експериментальних досліджень знаходиться в межах 8-10%, що підтверджує адекватність та достовірність отриманих раніше результатів. Експериментальна крива не має відповідного максимуму потужності в області швидкості вітру 12 м/с, оскільки для симуляції ротора установки використовувався привідний двигун постійного струму з незалежним збудженням.

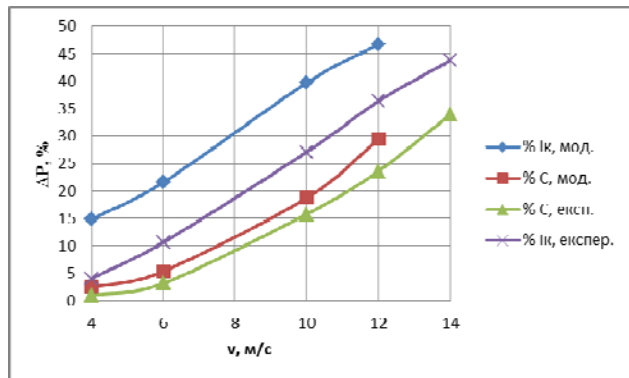
На рис. 11 наведено залежність вихідної потужності від швидкості вітру при подачі постійної за величиною напруги на додаткову обмотку підмагнічування.



**Рисунок 11.** Залежність потужності генератора від швидкості вітру при подачі напруги на додаткову обмотку

По рис. 11 видно, що розбіжність між результатами імітаційного моделювання та експериментальних досліджень знаходиться в межах 7-10%, що підтверджує адекватність та достовірність отриманих результатів при використанні додаткової обмотки підмагнічування.

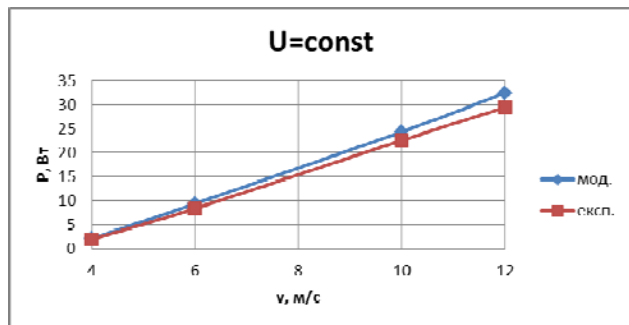
Ефективність використання запропонованих методів регулювання вихідної потужності системи можливо оцінити за аналізу глибини регулювання потужності. Залежність приросту потужності для кожного значення швидкості вітру наведено на рис. 12.



**Рисунок 12.** Глибина регулювання потужності при подачі напруги на додаткову обмотку та приєднанні додаткової ємності

З рис. 12 видно, що при збільшенні швидкості вітру та постійних значеннях параметрів глибина регулювання потужності досягає 40-45 %. За середньостатистичної швидкості вітру застосування підмагнічування дозволяє підвищити вихідну потужність генератора на 10-15% при підключенні додаткової ємності та 17-25% при подачі напруги на додаткову підмагнічувальну обмотку. Використання додаткової обмотки підмагнічування є більш ефективним методом регулювання вихідної потужності генератора у складі вітроустановки. Розбіжність між експериментальними даними та результатами імітаційного моделювання пояснюється похибками вимірювальних приладів, не стабільністю мережі живлення привідного двигуна та втратами у пасовій передачі системи привідного двигуна та генератора.

Залежність вихідної потужності генератора за різної швидкості вітру та постійній напрузі на затискачах генератора наведено на рис. 13. В даному досліді струм додаткової обмотки регулюється таким чином, щоб отримати постійну за величиною напругу на затискачах генератора.



**Рисунок 13.** Залежність потужності генератора від швидкості вітру

За такого способу керування параметрами електрогенератора також спостерігається збільшення вихідної потужності генератора на  $\approx 10-20\%$ . Розбіжність між результатами експерименту та імітаційного моделювання також знаходяться в межах 7-10%. Потуж-

ність керування додатковою обмоткою за максимального струму керування при цьому становить до 15% від максимальної потужності генератора.

### V. ВИСНОВКИ

Розроблено експериментальний стенд для дослідження параметрів та характеристик автономного магнітоелектричного генератора у складі вітроенергетичної установки. За допомогою розробленого стенду проведено оцінку можливості корекції вихідної активної потужності генератора за різних режимів його роботи.

Більш ефективним способом регулювання вихідної активної потужності є використання додаткової підмагнічувальної обмотки, оскільки даний метод не викликає додаткових втрат в режимі малих навантажень та є більш ефективним з точки зору збільшення вихідної потужності.

При постійній швидкості обертання генератора та збільшенні навантаження ефективність корегування вихідної активної потужності падає, що пояснюється збільшенням механічних та електричних втрат в генераторі.

Використання підмагнічування додатковою обмоткою дозволяє підвищити вихідну активну потужність на: 44%, 35,5%, 18,07%, 21,6% при швидкості обертання 200 об/хв, 350 об/хв, 550 об/хв та 650 об/хв відповідно.

Аналіз застосованих методів показує, що можливо підвищити вихідну потужність генератора на 10-15% при підключенні додаткової ємності та 17-25% при подачі напруги на додаткову обмотку.

За умови підтримки вихідної напруги генератора  $U_1=14,4$  В також збільшується вихідна потужність на запусках генератора на 30 % при 200 об/хв, 12,5% при 350 об/хв, 9,7% при 550 об/хв та 17,6% при 650 об/хв.

Порівняння результатів експериментальних досліджень із результатами імітаційного математичного моделювання показує збіжність результатів в межах 7-10%, що підтверджує адекватність розроблених моделей та достовірність отриманих результатів.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] В.М. Головка, Коваленко І.Я., Е.А. Монахов, О.І. Пономарьов (2018). Порівняння традиційного генератора із постійними магнітами з торцевим генератором із двохсторонньою активною поверхнею для вітроустановок, Відновлювана енергетика, Київ, 2018, №2(53), С. 30-38.
- [2] В.М. Головка, М.А.Коваленко, Коваленко І.Я., І. Р.Галасун (2020). Математичне моделювання автономної вітроустановки з синхронним генератором магнітоелектричного типу. Відновлювана енергетика, Київ.- 2020. - №4(63), с.50-58.
- [3] Коваленко І.Я. (2021). Робота синхронного генератора з постійними магнітами при підмагнічуванні сторонньою ємністю. Відновлювана енергетика, Київ.- 2021. - №1(64), с.50-58.
- [4] F. O. Ribeiro, João A. Vasconcelos Robust Design of an Axial-Flux Permanent Magnet Synchronous Generator Based on Many-Objective Optimization Approach // IEEE Transactions on Magnetics 2018. - № 54. – P. 12-22.
- [5] Nedjar, B.; Hlioui, S.; Amara, Y.; Vido, L.; Gabsi, M.; Lécrivain, M. A new parallel double excitation synchronous machine. IEEE Trans. Magn. 2011, 47, 2252–2260.
- [6] Hua, H., Zhu, Z.Q., Zhan H. Novel Consequent-Pole Hybrid Excited Machine with Separated Excitation Stator // IEEE Trans. Ind. Electron. 2016, 63, 4718–4728.
- [7] Wardach, M.; Paplicki, P.; Palka, R. Hybrid Excited Machine with Flux Barriers and Magnetic Bridges // Energies 2018, 11, 676.
- [8] Asfirane, S.; Hlioui, S.; Amara, Y.; Gabsi, M. Study of a Hybrid Excitation Synchronous Machine: Modeling and Experimental Validation. Math. Comput. Appl. 2019, 24, 34.
- [9] Vadim Chumack, Serhii Tsyvinskyi, Mykhailo Kovalenko, Alexej Ponomarev, Ihor Tkachuk Mathematical modeling of a Synchronous generator with combined excitation // (2020) Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 1 (5 (103)), 30-36. doi 10.15587 / 1729-4061.2020.193495.
- [10] Wang W., H. Mi, Longbo M. Study and Optimal Design of a Direct-Driven Stator Coreless Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Generator with Improved Dynamic Performance. Energies, 2018, no.11, p. 3162. <https://doi.org/10.3390/en11113162>.
- [11] Radwan-Pragłowska N., Wegiel T., Borkowski D. Modeling of Axial Flux Permanent Magnet Generators. Energies, 2020, no.13 (21), p. 5741. <https://doi.org/10.3390/en13215741>.
- [12] Eldoromi M. Improved design of axial flux permanent magnet generator for small-scale wind turbine / Mojtaba Eldoromi, Sajjad Tohidi, Mohammad Reza Feyzi // Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, 2017, no. 26, pp. 3084-3099. <https://journals.tubitak.gov.tr/elektrik/issues/elk-18-26-6/elk-26-6-25-1711-402.pdf>
- [13] Marek Goł, Ebiowski, Andrzej Smoleń, Lesław Gołebowski, Damian Mazur. Functional simulation model of the axial flux permanent magnet generator. Archives of Electrical Engineering. 2018. vol. 67(4). Pp. 857-868. <https://dx.doi.org/10.24425/aee.2018.124745>.
- [14] Mojtaba Eldoromi, Sajjad Tohidi, Mohammad Reza Feyzi. Improved design of axial flux permanent magnet generator for small-scale wind turbine.

Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences. 2017. No. 26. Pp. 3084-3099. <https://doi.org/10.3906/elk-1711-402>.

[15] Zhaoqiang Zhang, Robert Nilssen, S. M. Muyeen, Arne Nysveen, Ahmed Al-Durra. Design Optimization of ironless multi-stage axial-flux permanent magnet generators for offshore wind turbines. Engineering Optimization. 2017. Vol. 49. Pp. 815-827. <https://doi.org/10.1080/0305215X.2016.1208191>.

[16] Перминов Ю.Н., Коханевич В.П., Зинченко Т.В. Алгоритм расчета синхронных генераторов торцевой конструкции с двумя магнитными системами, расположенными по торцам статора, для ветроэнергетических установок. Відновлювана енергетика. 2016. № 2. С. 45-49.

Стаття надійшла до редакції 08.01.2021

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА КОРРЕКЦИИ МОЩНОСТИ ГЕНЕРАТОРА АВТОНОМНОЙ ВЕТРОЭЛЕКТРОУСТАНОВКИ

КОВАЛЕНКО М.А. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры электромеханики национального технического университета Украины "Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского" Киев, Украина, e-mail: [kovalenko\\_ma@i.ua](mailto:kovalenko_ma@i.ua);

КОВАЛЕНКО И.Я. аспирант кафедры возобновляемых источников энергии национального технического университета Украины "Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского" Киев, Украина, e-mail: [2048141@ukr.net](mailto:2048141@ukr.net);

ГОЛОВКО В.М. доктор технических наук, профессор, профессор кафедры возобновляемых источников энергии национального технического университета Украины "Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского" Киев, Украина, e-mail: [golovkovm@ukr.net](mailto:golovkovm@ukr.net);

ЧУМАК В.В. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры электромеханики национального технического университета Украины "Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского" Киев, Украина, e-mail: [chumack\\_kpi@ukr.net](mailto:chumack_kpi@ukr.net);

СВЯТНЕНКО В.А. старший преподаватель, кафедра теоретической электротехники национального технического университета Украины "Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского" Киев, Украина, e-mail: [vadiksv@gmail.com](mailto:vadiksv@gmail.com).

**Цель работы.** Провести оценку эффективности регулирования выходной активной мощности магнитоэлектрического генератора в составе автономной ветроэлектроустановки.

**Методы исследования.** Анализ существующих методов коррекции выходных параметров генераторов. Методы экспериментального исследования электрогенераторов. Численные методы обработки полученных результатов.

**Полученные результаты.** Разработан экспериментальный стенд для исследования параметров и характеристик автономного магнитоэлектрического генератора в составе ветроэлектроустановки с целью оценки эффективности коррекции исходной мощности генератора. Проведены экспериментальные исследования магнитоэлектрического генератора в режиме холостого хода для двух случаев: характеристика холостого хода при подмагничивании с применением сторонней емкости; характеристика холостого хода при подмагничивании дополнительной обмоткой (при подаче постоянного тока). В данном опыте выходное напряжение увеличивается от 26% (при скорости вращения 200 об/мин) до 47% (при скорости вращения 780 об/мин). метода коррекции выходной мощности путем присоединения дополнительной емкости к обмотки якоря генератора является менее эффективным методом регулирования мощности, чем использование подмагничивания дополнительной обмоткой. проведены следующие исследования: исследование эффективности использования обмотки подмагничивания при постоянной активной нагрузке и при разной скорости вращения (разной скорости ветра); исследование эффективности использования обмотки подмагничивания при поддержании постоянного напряжения на зажимах генератора 14,4 В. Глубин а регулирование выходной мощности зависит от скорости вращения ротора ветроустановки и по результатам экспериментальных исследований, для нагрузки  $I=0,8$  А составляет: 1,4% при 350 об/мин; 12,5% при 550 об/мин; 15,3% при 650 об/мин; 22,12% при 750 об/мин. Более эффективным методом является использование дополнительной подмагничивающей обмотки. Проведен сравнительный анализ исходных параметров магнитоэлектрического электрогенератора, полученных путем экспериментальных исследований и имитационного численного моделирования. Сравнение результатов моделирования с результатами экспериментальных исследований показывают схожесть полученных результатов в пределах 7-10%, что подтверждает адекватность разработанных моделей и достоверность полученных ре-



зультатов.

**Научна новизна.** Путем экспериментальных исследований магнитоэлектрического генератора установлены пределы коррекции выходной мощности генератора в составе автономной ветроэлектроустановки.

**Практическая ценность.** Разработан экспериментальный стенд для исследования магнитоэлектрического генератора с осевым магнитным потоком для имитации его работы в составе автономной ветроэлектроустановки.

**Ключевые слова:** экспериментальное исследование; магнитоэлектрический генератор; автономная ветроэлектроустановка; коррекция выходной мощности; пределы регулирования.

## EXPERIMENTAL EVALUATION OF GENERATOR POWER CORRECTION OF AN AUTONOMOUS WIND ELECTRICAL INSTALLATIONS

- KOVALENKO M.A. PhD, Associate Professor Department of Electromechanics National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", e-mail: kovalenko\_ma@i.ua;
- KOVALENKO I.Y. Graduate Student Department of Renewable Energy Sources, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" e-mail: 2048141@ukr.net;
- GOLOVKO V.M. Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Renewable Energy Sources of the National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky" Kyiv, Ukraine, e-mail: golovkovm@ukr.net;
- CHUMACK V.V. PhD, Associate Professor Department of Electromechanics National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", chumack\_kpi@ukr.net;
- SVYATNENKO V.A. Senior Lecturer, Department of Theoretical Electrical Engineering, National Technical University of Ukraine, Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky Kyiv, Ukraine, e-mail: vadiksv@gmail.com.

**Purpose.** To evaluate the efficiency of regulating the output active power of the magnetolectric generator as part of an autonomous wind turbine.

**Methodology.** Analysis of existing methods of adjusting the output parameters of generators. Methods of experimental research of electric generators. Numerical processing methods of the obtained results.

**Findings.** An experimental stand was developed to study the parameters and characteristics of an autonomous magnetolectric generator as part of a wind turbine in order to assess the effectiveness of correcting the output power of the generator. Experimental studies of the magnetolectric generator in the idle mode for two cases are carried out: the characteristic of idling at magnetization with use of a third-party capacity and the idle characteristics when magnetized by an additional winding (with DC supply). In this experiment, the output voltage increases from 26% (at a speed of 200 rpm) to 47% (at a speed of 780 rpm). Studies have shown that the use of the method of correcting the output power by connecting additional capacity to the armature winding of the generator is a less effective method of power control than the use of magnetization by the additional winding. The following studies were conducted: study of the efficiency of the magnetizing winding at constant active load and at different speeds (different wind speeds), study of the efficiency of the magnetizing winding while maintaining a constant voltage at the generator terminals 14.4 V. Depth of the output power regulation depends on the rotation speed of the wind turbine rotor and according to the results of experimental studies, for a load of  $I = 0.8$  A is: 1.4% at 350 rpm; 12.5% at 550 rpm; 15.3% at 650 rpm; 22.12% at 750 rpm. A more efficient method is to use an additional sub-magnetizing winding. A comparative analysis of the initial parameters of the magnetolectric generator is obtained by experimental studies and numerical modeling simulation. Comparison of modeling results with the results of experimental studies shows the convergence of the obtained results within 7-10%, which confirms the adequacy of the developed models and the reliability of the obtained results.

**Originality.** By means of experimental researches of the magnetolectric generator the limits of output power correction of the generator as a part of the independent wind electric installation are established.

**Practical value.** An experimental stand was developed for the study of a magnetolectric generator with axial magnetic flux to simulate its operation as part of an autonomous wind turbine.

**Keywords:** experimental research; magnetolectric generator; autonomous wind turbine; output power correction; limits of regulation.

## REFERENCES

- [1] Holovko, V.M., Kovalenko, I.Ia., Monakhov, E.A., Ponomarov, O.I. (2018). Porivniannia tradytsiinoho he-neneratora iz postiinyymi mahnitamy z tortsevym he-neneratorom iz dvukhstoronnoiu aktyvnoiu poverkhnieu dlia vitroustanovok, Vidnovliuvana enerhetyka, Kyiv, No 2(53), S. 30-38.
- [2] Holovko, V.M., Kovalenko, M.A., Kovalenko, I.Ia., Halasun, I. R. (2020). Matematychni modeliuvannia av-tonomnoi vitroustanovky z synkhronnym henerato-rom mahnitoelektrychnoho typu. Vidnovliuvana enerhetyka, Kyiv, No 4(63), s.50-58.
- [3] Kovalenko, I.Ia. (2021). Robota synkhronnoho heneratora z postiinyymi mahnitamy pry pidmahnichuvanni storonnoiu yemnistiu. Vidnovliuvana enerhetyka, Kyiv, No 1(64), s.50-58.
- [4] Ribeiro, F. O., João, A. (2018). Vasconcelos Robust Design of an Axial-Flux Permanent Magnet Synchronous Generator Based on Many-Objective Optimization Approach. *IEEE Transactions on Magnetics*. No 54, 12-22.
- [5] Nedjar, B.; Hlioui, S.; Amara, Y.; Vido, L.; Gabsi, M.; Lécrivain, M. (2011). A new parallel double excitation synchronous machine. *IEEE Trans. Magn.* 47, 2252–2260.
- [6] Hua, H., Zhu, Z.Q., Zhan, H. (2016). Novel Consequent-Pole Hybrid Excited Machine with Separated Excitation Stator. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 63, 4718–4728.
- [7] Wardach, M., Paplicki, P., Palka, R. (2018). Hybrid Excited Machine with Flux Barriers and Magnetic Bridges, *Energies* 11, 676.
- [8] Asfirane, S., Hlioui, S., Amara, Y., Gabsi, M. (2019). Study of a Hybrid Excitation Synchronous Machine: Modeling and Experimental Validation. *Math. Comput. Appl.* 24, 34.
- [9] Chumack, V., Tsyvynskyi, S., Kovalenko, M., Ponomarev A. (2020). Ihor Tkachuk Mathematical modeling of a Synchronous generat. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies* or with combined excitation, 1 (5 (103)), 30-36. doi 10.15587 / 1729-4061.2020.193495.
- [10] Wang, W., H. Mi, Longbo M. (2018). Study and Optimal Design of a Direct-Driven Stator Coreless Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Generator with Improved Dynamic Performance. *Energies*, No. 11, p. 3162. <https://doi.org/10.3390/en11113162>.
- [11] Radwan-Pragłowska, N., Wegiel, T., Borkowski, D. (2020). Modeling of Axial Flux Permanent Magnet Generators. *Energies*, No. 13 (21), p. 5741. <https://doi.org/10.3390/en13215741>.
- [12] Eldoromi, M. (2017). Improved design of axial flux permanent magnet generator for small-scale wind turbine / Mojtaba Eldoromi, Sajjad Tohidi, Mohammad Reza Feyzi//*Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, No. 26, pp. 3084-3099. <https://journals.tubitak.gov.tr/elektrik/issues/elk-18-26-6/elk-26-6-25-1711-402.pdf>
- [13] Marek Goł, Ebiowski, Andrzej Smoleń, Lesław Gołebowski, Damian Mazur. Functional simulation model of the axial flux permanent magnet generator. *Archives of Electrical Engineering*. 2018. Vol. 67(4). Rp. 857-868. <https://dx.doi.org/10.24425/aee.2018.124745>.
- [14] Mojtaba Eldoromi, Sajjad Tohidi, Mohammad Reza Feyzi, (2017). Improved design of axial flux permanent magnet generator for small-scale wind turbine. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*. No. 26. Pp. 3084-3099. <https://doi.org/10.3906/elk-1711-402>.
- [15] Zhaoqiang Zhang, Robert Nilssen, S. M. Muyeen, Arne Nysveen, Ahmed Al-Durra. (2017) Design Optimization of ironless multi-stage axial-flux permanent magnet generators for offshore wind turbines. *Engineering Optimization*. Vol. 49. 815-827. <https://doi.org/10.1080/0305215X.2016.1208191>.
- [16] Permynov, Yu.N., Kokhanevych, V.P., Zynchenko, T.V. (2016). Alhorytm rascheta synkhronnykh heneratorov tor-tsevoi konstruktsyy s dvumia mahnytnymy systema-my, raspolozhenymy po tortsam statora, dlia vetroenerhetycheskykh ustanovok. *Vidnovliuvana enerhetyka*. No 2. S. 45-49.

УДК 621.311

## ЗАСТОСУВАННЯ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ СХЕМИ ЗАМІЩЕННЯ ТРАНСФОРМАТОРА В УМОВАХ НЕІНВАЗІЙНОГО МОНІТОРИНГУ

- РЕВА І.В. аспірант, кафедри систем електроспоживання та енергетичного менеджменту Кременчуцького національного університету ім. Михайла Остроградського, Кременчук, Україна, e-mail: cgdizainer@gmail.com;
- ТОДОРОВ О.В. аспірант, кафедри систем електроспоживання та енергетичного менеджменту Кременчуцького національного університету ім. Михайла Остроградського, Кременчук, Україна, e-mail: olehtodorov@gmail.com;
- БЕЗЗУБ М.А. аспірант, кафедри систем електроспоживання та енергетичного менеджменту Кременчуцького національного університету ім. Михайла Остроградського, Кременчук, Україна, e-mail: bezzubmax@gmail.com;

**Мета роботи.** Застосування апарату спеціально побудованої нейромережі із задачею ідентифікації схеми заміщення параметрів у мовах неінвазійного моніторингу.

**Методи дослідження.** Використання методів електричних вимірювань методом неінвазійного моніторингу, методів ідентифікації та навчання нейронних мереж базованих на похибці попереднього та зворотного поширення, мереж типу NARX

**Отримані результати.** Силовий трансформатор важливий об'єкт енергетичної системи електричної цехової підстанції. При цьому можливі часті переходи від режиму недовантаження до часткового перевантаження, що створює передумови до розвитку небажаних явищ у трансформаторах. Моніторинг силового трансформатора базуючись на контролі його схеми заміщення, дозволяє перейти до контролю його основних параметрів в незалежності від робочого режиму. Неінвазійний моніторинг добре справляється в контексті поставленої задачі, адже як показують дослідження параметри напруги та струму, яким оперує добре відображують в собі залежність від зміни параметрів схеми заміщення. Спираючись на Т еквівалентну схему заміщення можна виявити та спрогнозувати зміни параметрів схеми заміщення відповідно до параметрів режиму струмів та напруг протікаючих в цій системі. багато нейронних мереж відпрацюють розрахунок електричних та електротехнічних еквівалентних схем як задачу ідентифікації параметрів електричних кіл в умовах статичних режимів. В процесі ідентифікації перевірялося здатність нейромереж різних конструкцій ідентифікувати один із параметрів схеми заміщення, протистояти пошкодженню, що корегувало значення невідомого параметру. Проведений експеримент дав можливість отримати дані для порівняння ефективності різних архітектур нейромереж по відношенню з реальними параметрами схеми заміщення. Конкретизуючи отримані результати говоримо що архітектура NARX здатна до ідентифікації параметрів в стандартних режимах для всіх елементів схеми заміщення, що в подальшому відкриває можливість для її вдосконалення для розрахунків нелінійних елементів трансформатора при роботі що в стані насичення

**Наукова новизна.** Встановлено, що нейромережі досліджені у роботі здатні визначати параметри схеми заміщення трансформатора чи електричної машини в статичних робочих режимах, що дозволяє в подальшому контролювати стан обмоток та магнітопроводу відповідно до їх значень

**Практична цінність.** Застосовуючи в системі моніторингу нейронної мережі дозволяє отримати чіткі значення параметрів схеми заміщення незалежно від режиму, запропонований метод значно зменшує кількість часу затраченої на моніторинг параметрів трансформатора, дозволяє контролювати рівень потужності, а також, за необхідності, зменшити кількість необхідної інформації для моніторингу трансформатора

**Ключові слова:** моніторинг трансформатору; неінвазійний моніторинг; нейронна мережа; ідентифікація параметрів схеми заміщення; Т-подібна схема заміщення трансформатору.

### І. ВСТУП

Силовий трансформатор важливий об'єкт енергетичної системи електричної цехової підстанції. В сучасних енергомережах його навантаження завжди змінюється відповідно до режиму роботи самої підстанції та самих споживачів енергії. При цьому можливі часті переходи від режиму недовантаження до

часткового перевантаження, що створює передумови до розвитку небажаних явищ у трансформаторах. Як в разі відсутності їх моніторингу та фіксації спричиняють поломки в конструктивних частинах, що в тривалій перспективі призводить до зупинки трансформатора, витрат на капітальний ремонт і його відновлення, що є не бажаним для промислових процесів та виробництв, адже впливає на їхню рентабельність. З

метою недопущення втрат параметри трансформатора підлягають моніторингу шляхом виміру доступних значень опору та індуктивності, їх порівняння з допустимими значеннями розрахованими для цього трансформаторами на рівні проектування та виробництва і ввідних випробувань. Однак із часом під впливом старіння матеріали конструкції трансформатора, особливо ізоляція обмоток, виводів та магнітопроводу, їх параметри активного опору та індуктивності зазнають зміни, що негативно позначається на показниках та їх різниці із паспортними параметрами опору та індуктивності. Для їх перевірки звертаються до методів моніторингу, таких як контроль імпедансу, виміри опорів обмоток, тестування зарядом при яких проводиться відключення трансформатора і механічне проникнення в його конструктивні частини. Однак це дає добрі результати лише при режимі Off-Line, але дає значні похибки при підключенні навантаження і встановлення змінного режиму. В такій ситуації все більше необхідності зростає в неінвазивному моніторингу [1] котрий дозволяє отримувати параметри режиму при зміні струмів та напруг для послідовного його моніторингу параметрів трансформатора. Застосовуючи обмежений набір датчиків, що фіксують лише струм та напругу зі сторони ВН та НН досягається не пошкодження конструктивних частин трансформатора. Описана неруйнівна діагностична техніка (НДТ) зберігаючи конструкцію, дозволяє контролювати параметри режиму в режимі реального часу [2] в основі якої покладено визначення внутрішніх дефектів компонентів машини, таких як внутрішні тріщини, поверхневі тріщини, невидимі неозброєним оком. Прояв яких може впливати на форму кривих струму чи напруги відповідно як параметрів режиму, які в свою чергу можуть бути застосовані для розрахунку еквівалентної схеми заміщення трансформатора. Що надає змогу контролювати та діагностувати загальний стан роботи трансформатора в практичних умовах застосування. При цьому отримані дані можна застосувати як ідентифікатори станів та процесів в трансформаторі для систем на основі експертної оцінки та Штучного інтелекту. Особливістю сучасних систем моніторингу часто ґрунтується на використанні алгоритмів пошуку та ідентифікації невідомих параметрів спираючись на аналіз доступних виміряних на вході та виході параметрів реального режиму роботи ідентифікованого об'єкта. Серед найбільш застосованих тут технологій визначають Інтелектуальні нейронні мережі (ANN) котрі часто застосовуються в захисті трансформаторів [3], що виділяються на фоні фазової логіки, математично емпіричних методів, можливість навчання та застосування в умовах з порушенням умов, при яких інші методики видають результати зі значною похибкою або взагалі відмовляються працювати. При роботі трансформатора як нелінійної системи, використання нейронних мереж надає можливість відслідковувати динаміку зміни параметрів в динамічному середовищі робочого режиму. Крім того, для цілей контролю моделі NN повинні бути легко

запроваджені доповнення, мають відносно просту структуру, бути міцними проти збурень і змін параметрів, і мають можливість регулювати свої параметри (ваги) онлайн. Спираючись на параметри режиму доступні при НДТ струми та напруги сторін ВН та НН, із доступних місць для підключення та в деяких випадках навіть в НН при моніторингу низької напруги та потужності можуть бути застосовані для задачі ідентифікації параметрів схеми [4].

## II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Перше описане застосування нейронної мережі як індикатор параметрів схеми заміщення, описане в роботі [5], де автор презентував методологію оцінки параметрів моделі трансформатора, що моделює його роботу в розумному широкому діапазоні частот. Штучний нейрон мережі (ANN) використовується для оцінки передатної функції обмотки трансформатора з даних, отриманих з FRA (частоти вимірювання відповіді). Структура синапсів, використана в ANN точно дотримується конструктивної форми передачі функція і алгоритм Gradient Descendent (градієнтний спуск) використовується для мінімізувати помилку зворотного поширення. Однак автор не врахував таких недоліків FRA як зазвичай його можна застосовувати лише до лінійних систем. Коли цей підхід застосовується до нелінійної системи, отриманий результат не є точним.

У роботі [6] автором представлено рішення на основі відкритої рекурентної нейронної мережі (CVORNN) що завдяки використанню комплексних чисел, розширює застосування NN за рахунок застосування даних в природній формі для електротехніки. Автор якісно розглядає нелінійність та намагніченість трансформатора та її вплив на режими роботи трансформатора, представляє покроковий алгоритм навчання нейромережі і можливостями корекції даних відповідно нелінійності та додаткового шуму в аналітичній моделі для генерування даних виконуючої моделі на базі NN. Однак незважаючи на обширну новизну система розглядається в контексті моделювання і не виконує функцію ідентифікації параметрів схеми заміщення, що не дуже добре для системи в арсеналі якої є розрахунок параметрів відповідно емпіричних залежностей опорів до температури роботи трансформатора.

Звертаючись до роботи [7] ми бачимо розгляд проблеми ідентифікації параметрів схеми заміщення Т подібної схеми трансформатора на основі реальних вимірів із інтеграцією оптимізаційних та метаурістичних алгоритмів [8], що мають між собою суттєві відмінності, як у випадку із аналогічними дослідженнями [9] та [10] застосовані алгоритми добре себе показують в статичних мірах режиму однак складність їх розуміння вимагає специфічних математичних знань та необхідності розрахунків для кожного окремого трансформатора та випадку окремо. Слід зазначити, що застосування в роботі [7] параметрів неінвазивного

моніторингу значно здешевлює і розрахунки і побудовану таким чином вимірювану систему.

Найбільш вдалим та простим рішенням є робота автора [11] в котрій автор спираючись на Т подібну схему асинхронного двигуна та паспортні параметри, розраховує повну схему заміщення для всіх опорів та індуктивностей при цьому застосовуючи та тестуючи різноманітні структури ANN дає прекрасний результат в умовах малої кількості даних та спираючись на передаточні відношення електричної машини, що робить систему застосовану і в умовах трансформатора. З недоліком слід виділити застосування паспортних даних в параметрах вхідних даних, що незавжди можливо в умовах трансформаторів довго часу експлуатації. Аналізуючи вищеописаний матеріал виникає необхідність у застосуванні нейронної мережі для визначення параметрів схем заміщення трансформатора при цьому застосовуються лише виміряні параметри режиму як напруга та струм ВН та НН що доступні в режимах роботи трансформатора без відключення і з малим впливом на конструкцію в умовах неінвазійного моніторингу.

### III. МЕТА РОБОТИ

Метою роботи є побудова структури нейронної мережі для ідентифікації параметрів схеми заміщення подібної трансформатора за наявності параметрів режиму як струму та напруга ВН та НН в умовах неінвазійного моніторингу. Процес навчання NN з можливістю виявлення пошкоджень в стаціонарних режимах

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

Моніторинг силового трансформатора базуючись на контролі його схеми заміщення, дозволяє перейти до контролю його основних параметрів в незалежності від робочого режиму. Неінвазійний моніторинг добре справляється в контексті поставленої задачі, адже як показують дослідження параметри напруги та струму, яким оперує добре відображують в собі залежність від зміни параметрів схеми заміщення. Спираючись на Т еквівалентну схему заміщення можна виявити та спрогнозувати зміни параметрів схеми заміщення відповідно до параметрів режиму струмів та напруг протікаючих в цій системі. Тому багато нейронних мереж відпрацюють розрахунок електричних та електротехнічних еквівалентних схем як задачу ідентифікації параметрів електричних кіл в умовах статичних режимів та компонентів [12] та динамічних [13].

Для будь-якої нейромережі, що моніторить електрообладнання, необхідний обсяг даних, що відображає роботу цього обладнання в різних режимах, і містить сигнали що допомагають його ідентифікувати на прикладі X вектору вхідного сигналу ознак та Y вектору вихідного сигналу цілей. На практиці найбільш застосовується сигнал вхідних та вихідних еле-

ктричних параметрів [14]. Для подальшої наглядності звернемося до електричної еквівалентної схеми представленої на (рис. 1), де відображена еквівалентна схема параметрів трансформатора, де відображено роботу лінійного трансформатора при цьому гілка опору  $R_1$  та індуктивності  $L_1$ , відображає роботу первинної обмотки де діє напруга  $U_1$  та протікає струм  $I_1$ , послідовно підключена гілка опору  $R_2$  та індуктивності  $L_2$  відображає роботу вторинної обмотки де діє напруга  $U_2$  та протікає струм  $I_2$ , паралельно підключено гілка опору  $R_m$  та індуктивності  $L_m$  відображає контур магнітопроводу трансформатора

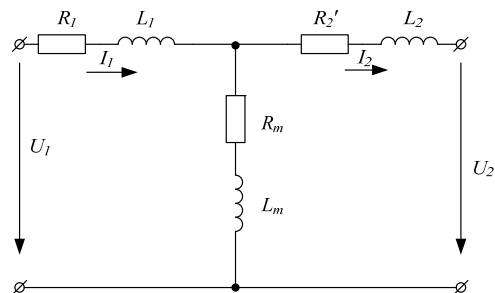


Рисунок 1. Представлена Т-подібна еквівалентна замісна схема трансформатора

З метою отримання вхідного сигналу від якого електричне обладнання трансформатора на практиці може бути змодельована як сигнал еквівалентної електричної заступної схеми з параметрами частоти, амплітуди, фазовим кутом відхилення. Було побудовано модель Т-подібної схеми електричного кола в математичному програмному пакеті візуального програмування. Де склад моделі має опис як блок *Ac Voltage Source* до якого послідовно буде підключена гілка опору  $R_1$  та індуктивності  $L_1$ , а за ними послідовно підключена гілка опору  $R_2$  та індуктивності  $L_2$ , між ними паралельно підключено гілка опору  $R_m$  та індуктивності  $L_m$ . Гілка опору  $R_2$  та індуктивності  $L_2$  послідовно з'єднується із навантаженням, котрим слугує блок *AC Current Source*, котрий замикає зовнішній контур кола послідовним підключенням до *Ac Voltage Source*. Паралельно *AC Current Source* підключаємо резистор  $R_m L_m 2$  для зменшення впливу перехідних явищ. Отриманий результат зображено на Рис 2.

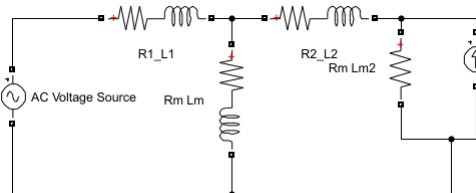


Рисунок 2. Побудована Т-подібна модель трансформатора у вигляді Т-подібної електричної схеми

Де параметри блоків представлені як *Ac Voltage Source*=220sqrt(2)V;  $R_1=1\Omega$ ;  $L_1=0.0016\text{Гн}$ ; *AC Current*



Source=15A;  $R_m=500\Omega$ ;  $L_m=0.016\text{Гн}$ ;  $R_2=0.9\Omega$ ;  $L_2=0.0001\text{Гн}$ ; Проведемо моделювання при якому спостерігаємо змінні у часі параметри режиму такі як миттєві значення напруги  $U_1$ , струму  $I_1$ , напруги  $U_2$  та струму  $I_2$  та незмінні параметри  $R_1, L_1, R_2, L_2$ . Тоді сформуємо гіпотезу, що при зміні значень параметрів блоків схеми заміщення  $R_1, L_1, R_2, L_2$  внаслідок пошкодження значення параметрів режиму напруги  $U_1$ , струму  $I_1$ , напруги  $U_2$  та струму  $I_2$  зміниться відповідно до впливу кожної гілки схеми заміщення на них. У зв'язку з тим, що на практиці робота трансформатора, часто має змінний характер від недовантаженого до перевантаженого, введемо подібні режими до експерименту встановивши значення струму в діапазоні -50%+50%. Аналогічно задаємо значення значення параметрів  $R_1, L_1, R_2, L_2$ . Перед запуском роботи моделі ввімкнемо вимір параметрів режиму на головних гілках моделі, та побудуємо блок систему збереження масиву даних режиму, що буде складатися із блок *Multimeter* котрий шляхом виміру миттєвих значень параметрів  $U_1, I_1$  та  $U_2, I_2$ , передає їх значення на блок *Fourier* де проводиться розклад в ряди Фур'є із вибором значення амплітуди сигналу та її подальшого розрахунку  $RMS_i$  та його фазового кута відхилення  $\phi_i$ , після цього отримані будуть передані на блок *ZOH* задля квантування нульового сигналу та зберігаються в блоці зберігання даних *Data*. Схема блоку представлена на (рис. 3)

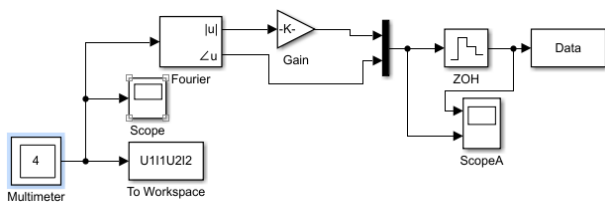


Рисунок 3. Побудована система виміру сигналу

Таблиця 1. Масив даних для навчальної вибірки

№	Параметри режиму експерименту								Параметри схеми заміщення					
	$U_{1RMS}$ (В)	$I_{1RMS}$ (А)	$U_{2RMS}$ (В)	$I_{2RMS}$ (А)	$\phi U_1$ (°)	$\phi I_1$ (°)	$\phi U_2$ (°)	$\phi I_2$ (°)	$R_1$ (Ом)	$L_1$ (мГн)	$R_m$ (Ом)	$L_m$ (мГн)	$R_2$ (Ом)	$L_2$ (Гн e-5)
1	219,9	14,6	195,6	10,6	-0,4	-2,5	-2,5	-0,4	1	1,6	50	16	0,9	10
2	219,9	9,4	205,5	5,3	-0,4	-3,4	-1,6	-0,4	1	1,6	50	16	0,9	10
3	219,9	14,8	202,8	10,6	-0,4	-2,6	-2,5	-0,4	0,5	1,6	50	16	0,9	10
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
239	219,9	14,8	198,0	10,6	-0,4	-2,9	-3,6	-0,4	0,5	2,4	50	16	1,35	5
240	219,9	20,0	188,5	15,9	-0,4	-2,4	-5,0	-0,4	0,5	2,4	50	16	1,35	5

В ході вибору оптимальної архітектури було проведе-

досліджуваної моделі трансформатора у вигляді Т подібної електричної схеми

В результаті моделювання розраховуються параметри режиму напруги  $U_1$ , струму  $I_1$ , напруги  $U_2$  та струму  $I_2$  відповідно до зміни значень параметрів  $R_1, L_1, R_2, L_2$  та струму *AC Current Source* в в діапазоні -50%+50%. Експортуємо ці дані із блоку зберігання даних *Data* в таблицю 1 даних для навчання нейромережі. Відповідно аналізуючи таблицю 1 формуємо вектори  $X$  вектору вхідного сигналу ознак та  $Y$  вектору вихідного сигналу цілей у вигляді вектору 240 рядів 8 стовпців параметрів котрі шляхом транспонування переводимо в 240 стовпців 8 рядків:

$$X = [U_{1RMS}, I_{1RMS}, U_{2RMS}, I_{2RMS}, \phi_{U_{1RMS}}, \phi_{I_{1RMS}}, \phi_{U_{2RMS}}, \phi_{I_{2RMS}}]^T \quad (1)$$

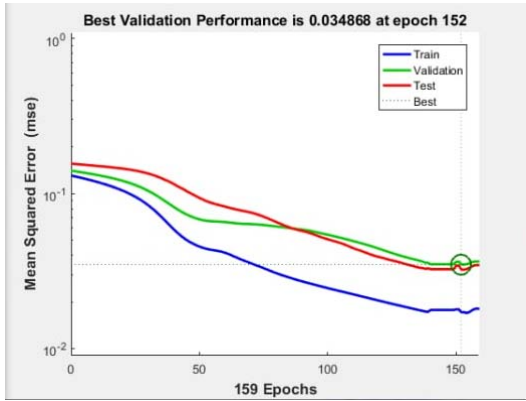
$$Y = [R_1, L_1, R_m, L_m, R_2, L_2]^T \quad (2)$$

Отримані вектори застосуємо як вектор вхідних сигналів для вектору  $X$  та  $Y$  як вектор цільових значень нейронної мережі. Наступним кроком буде вибір параметрів архітектури доступних у застосунку *NNtool*. *NNTool Matlab Neural Toolbox*, де спочатку вибираємо наявні  $X, Y$  і встановлюємо їм відповідні пріоритети як *NNInput* для вхідних даних та цільові значень як *NNtarget*, далі вибираємо відповідно потрібну архітектуру нейромережі.

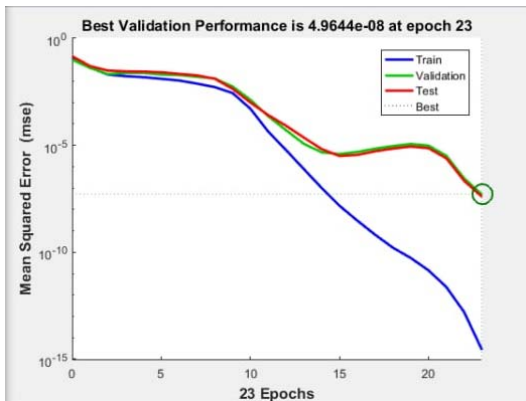
Відповідно до проведених досліджень найбільш застосованими мережами є Elman Backprop[15], Feed forward Backprop (FFB), FFB with TM, FFB with Delay[15], Layer Recurrent[15], NARX[16], Perceptron вказуючи функцію для тренування як *trainGD* та *LearnGDM*, *LearnGDM* за [17].

но порівняння двох архітектур застосованих на прак-

тицію. В ході досліджень спочатку була відібрана архітектура на рівні 35.15.1 нейронів однак під час тренування виявилось що така структура не для всіх нейромереж дає хорошу валідацію та точності, в порівнянні із в результаті при 15.8.1 яка дало меншу похибку Кількість шарів нейронної мережі, кількість нейронів відповідно до кожного шару було підібрано відповідно до результату. див (рис .4.)



а)



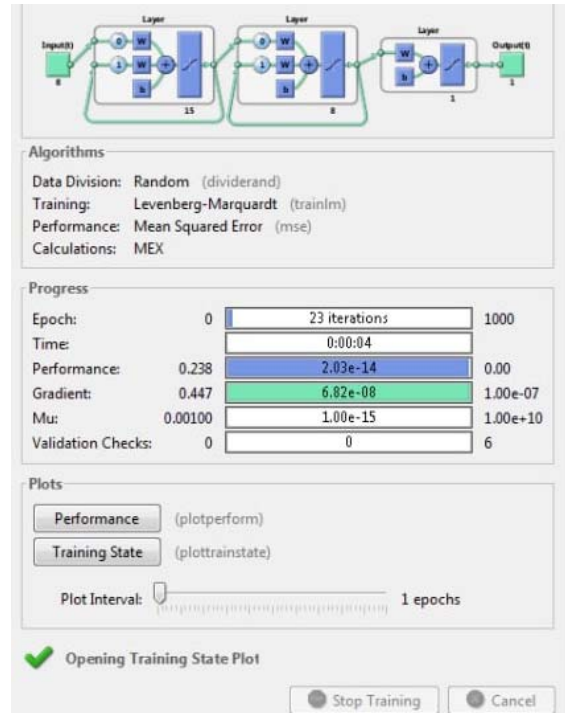
б)

**Рисунок 4.** Значення валідації похибки при різних кількостях нейронів а) 35.15.1; б) 15.8.1

Функцію перетворення була задана для всіх у вигляді тангенційної виду:

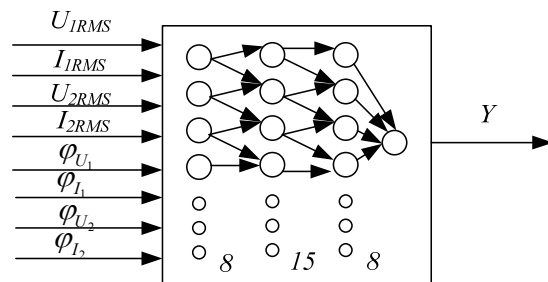
$$a = \tan \operatorname{sig}(n) \tag{3}$$

Тренуємо нейромережу і проводимо конвертування в блок Simulink за допомогою команди gensim (netName,1);Сам процес тренування для наочності зображено на Рис. 5



**Рисунок 5.** Приклад тренування нейромережі із певною архітектурою

Наступним етапом є підключення нейромережі до симульованої моделі із метою розрахунку реальних значень схеми заміщення. Для цього на вхід нейромережі, що складається із 8 входів подаються параметри відповідно до рівняння 1, а на виході з нейромережі отримуємо параметри відповідно до рівняння 2 див (рис 6.).



**Рисунок 6.** Відображення роботи нейромережі відповідно до параметрів симуляційної моделі

Отримана нейромережа була підключена до мережі з метою перевірки значень ідентифікації параметрів кола, для цього була побудована структура для контролю та порівняння вихідного параметру Y матиме вигляд на (рис 7.)

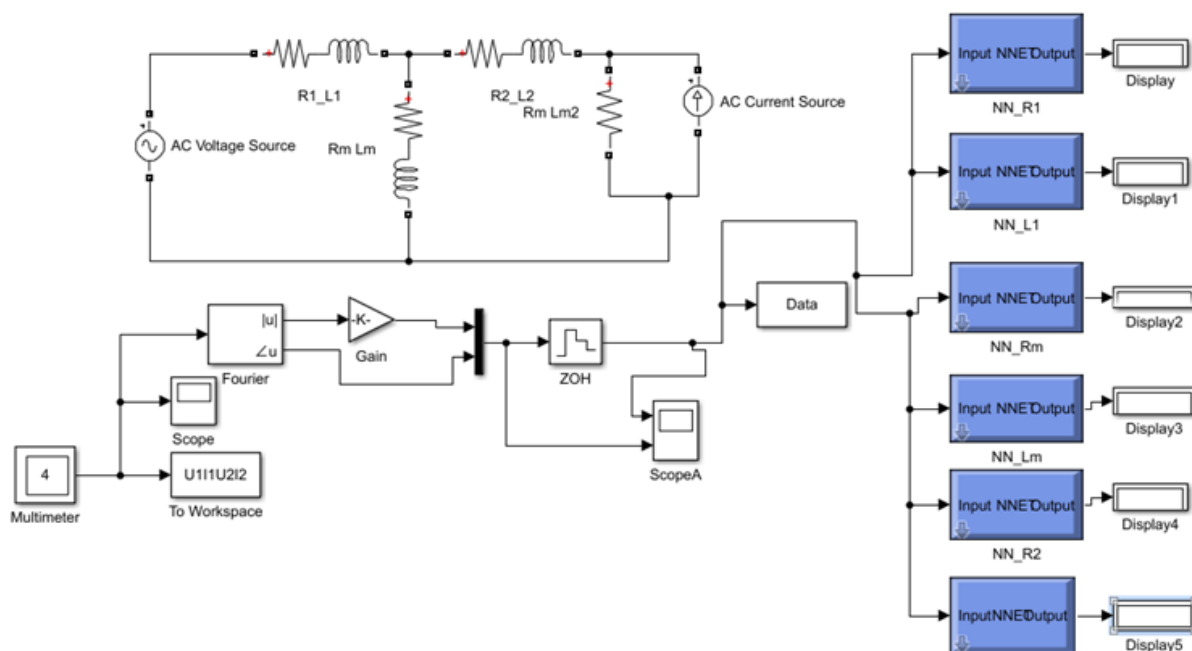


Рисунок 7. Фіксація виходу показників за межі довірчих інтервалів

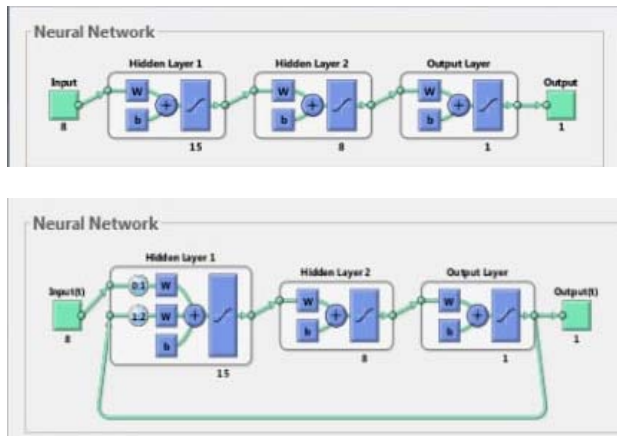
Таблиця 2. Результати експерименту при значенні параметру опору R1

Type of Network	Type of LA	N Layers	N neurons	Type of Error	Result	Error
Elman Backprop	trainGD LearnGDM	3	35/10/1	MSE	0.7382	0.26
Feed forward Backprop (FFB)	trainGD LearnGDM	3	35/15/1	MSE	0.07191	0.2809
FFB with TM	RANDOM Levenberg-Marquardt	3	15/8/1	MSE	1.197	0.196
FFB with Delay	RANDOM Levenberg-Marquardt	3	15/8/1	MSE	0.9984	0.0015
Layer Recurent	trainLm LearnGDM	3	15/8/1	MSE	1.5	0.5
NARX	RANDOM Levenberg-Marquardt	3	15/8/1	MSE	0.9911	0.0089
Perceptron	Cyclical Weight/ Bias Rule				1	0

В ході досліджень виявлено, що неймережі з архітектурою 15/8/1 показують більш точний



результат на коротких проміжках часу Найбільш точними виявилися мережі FFB with Delay та NARX з найменшою вимірною похибкою. Найбільш вдалі архітектури для визначення параметрів схеми заміщення короткотривалий період див.(рис. 8.)



**Рисунок 8.** Представлені найбільш вдалі архітектури а)FFB with Delay , б) NARX з найменшою вимірною похибкою відповідно до результатів похибки ідентифікованого опору

В процесі ідентифікації перевірялося здатність нейромереж різних конструкцій ідентифікувати один із параметрів схеми заміщення, протистояти пошкодженню, що корегувало значення невідомого параметру. В результаті більшість нейромереж показали задовільно в діапазоні 0.30 абсолютних одиниць протягом більшості часу експерименту  $T = 5c$  однак мережі FFB with Delay та NARX досягли результатів 0.0015 та 0.0089 , що задовольняє умови технічного завдання для системи моніторингу Для подальшого дослідження вибрані нейронні мережі були навчені визначати всі параметри схеми заміщення. Проведений експеримент дав можливість отримати дані для порівняння ефективності обох архітектур по відношенню з реальними параметрами схеми заміщення. Отримані результати було представлено в таблиці 3.

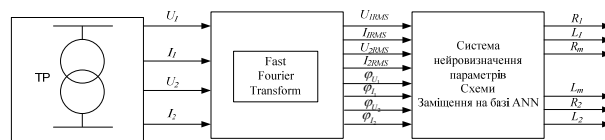
**Таблиця 3.** Результати порівняння оптимальних інфраструктур нейомереж

Параметр	Схема	FTD	NARX
R1 (Ом)	1	0.9984	0.9911
ВП+%	0	0.0015+(0.1)	0.00859 (0.8)
L1 (Гн)	0.0016	0.0022	0.001577
ВП+%	0	(-0.41) (41)	0.01422(1.4)

R1(Ом)	50	63.5	51.39
ВП+%	0	(0.27)(27)	(-0.027)(2.7)
Lm (Гн)	0.016	0.01272	0.016
ВП+%	0	0.2047(20)	(0.0030)(00.3)
R2 (Ом)	0.9	0.8041	0.8839
ВП+%	0	0.1066(10)	0.01785(1.7)
L2 (Гн)	0.0001	8.93e-05	8.11e-05
ВП+%	0	0.1882 (18)	0.1067(10)

Аналізуючи таблицю 3 можна говорити що нейромережі побудовані на архітектурі NARX більш точно розраховують параметри схеми заміщення і зберігають мінімальну похибку протягом встановленого часу , попри точність в одиночному визначенні параметрів мережі на базі архітектури FFB з часом збільшують свою чутливість та похибку від інших параметрів, що призводить до критичної похибки в розрахунках становила від 20 -40 % що є не бажаним для промислового вимірювального інтелектуального обладнання. Конкретизуючи отримані результати говоримо що архітектура NARX здатна до ідентифікації параметрів в стандартних режимах для всіх елементів схеми заміщення, що в подальшому відкриває можливість для її вдосконалення в розрахунках нелінійних елементів трансформатора при роботі що в стані насичення.

У результаті отримано систему ідентифікації параметрів T подібної схеми заміщення в статичних режимах відповідно до принципів неінвазійного моніторингу параметрів режиму див (рис. 9.)



**Рисунок 9.** Представлена система ідентифікації параметрів T подібної схеми заміщення в статичних режимах

### V. ВИСНОВКИ

У ході виконання роботи представлено алгоритм тренування нейромереж для визначення параметрів T подібних схем заміщення для нелінійних елементів. Визначені та експериментально підтверджені най-

більш архітектури нейронних мереж. Наступним кроком для подальшої роботи є закладений перехід на ідентифікацію та визначення нелінійних параметрів схем заміщення в режимах із нелінійними показниками. Робота має практичну цінність для побудови нейроінтерфейсів для визначення параметрів в системах статичного моніторингу параметрів електричного обладнання спираючись на неінвазивний метод моніторингу в умовах неінвазивного моніторингу.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Montana, J., Candelo-Becerra, J., Racines, D.-. (2018). Non-Intrusive Electrical Load Monitoring System Applying Neural Networks with Combined Steady-State Electrical Variables. *Tehnicki Vjesnik*, 25, 1321-1329, Doi:10.17559/TV-20170317203817..
- [2] Mohanty, A. R. (2015), Machinery condition monitoring: principles and practices. (1st ed.), CRC Press, doi.org/10.1201/9781351228626
- [3] Li, Z., Jiao, Z., He, A., (2020) Knowledge-based Artificial Neural Network for Power Transformer Protection, *IET General Transmission & Distribution*. 14(24), 5782-5791, DOI:10.1049/iet-gtd.2020.0542
- [4] Reeve, D., Barton, B, (2020) Low Voltage Monitoring, Primer and Guideline, October 2020, 113, <https://www.ena.org.nz/resources/publications/document/805>
- [5] Zambrano, G. M. V., A. C. Ferreira, Caloba, L. P., (2006), Power transformer equivalent circuit identification by artificial neural network using frequency response analysis, *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 6, doi: 10.1109/PES.2006.1708931.
- [6] Minin, A. S, Chistyakov Y.S. A., Kholodova E.V, & Zimmermann, H. G., Knoll, A. (2012). Complex-valued open recurrent neural network for power transformer modeling. *International. Journal of Applied Mathematics and Informatics*.6(1),41-48,
- [7] Kuczmann, M., Szűcs, A., Kovács, G., (2021), Transformer Model Identification by Ārtap: A Benchmark Problem, *Periodica Polytechnica Electrical Engineering and Computer Science*, 65(2), 123–130. <https://doi.org/10.3311/PPee.17606>
- [8] Abdelaziz, A. Y, Aleem S. H. E. A., and Yadav. A, (2021), Artificial Intelligence Applications in Electrical Transmission and Distribution Systems Protection, CRC Press, Boca Raton, 512, doi.org/10.1201/9780367552374.
- [9] Abdelwanis, M. I., Abaza, A., El-Sehiemy, R. A., Ibrahim, M. N., Rezk, H., (2020), Parameter Estimation of Electric Power Transformers Using Coyote Optimization Algorithm With Experimental Verification , *Preceding's in IEEE Access*, 8, 50036-50044, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2978398..
- [10] Arenas-Acuña, C. A. Rodríguez-Contreras, J. A. Montoya, O. D., Rivas-Trujillo, E., (2021) Black-Hole Optimization Applied to the Parametric Estimation in Distribution Transformers Considering Voltage and Current Measures, *Computers*, 10(10), 124, <http://dx.doi.org/10.3390/computers10100124>
- [11] Çetin, Z O., Dalcalı, A., Temurtaş, F., A (2020) Comparative study on parameters estimation of squirrel cage induction motors using neural networks with unmemorized training, *International Journal Engineering Science and Technology*,23(5) 1126-1133, doi.org/10.1016/j.jestch.2020.03.011.
- [12] Andrejevic Stosovic, Miona & Litovski, Vanco. (2003). Electronic circuit modeling using artificial neural network. *Journal of Automatic Control*. 13. 10.2298/JAC0301031A.
- [13] Jin, Z. and Kaba, S. (2021) Deep Neural Network Based Behavioral Model of Nonlinear Circuits. *Journal of Applied Mathematics and Physics*, 9, 403-412. doi: 10.4236/jamp.2021.93028.
- [14] Stegmayer, G.,(2004) Volterra series and neural networks to model an electronic device nonlinear behavior, 2004 IEEE International Joint Conference on Neural Networks (IEEE Cat. No.04CH37541), 4, 2907-2910 doi: 10.1109/IJCNN.2004.1381123.
- [15] Narendra K. S., Parthasarathy, K., (1990), Identification and control of dynamical systems using neural networks, *Preceding's in IEEE Transactions on Neural Networks*,1(1), 4-27, doi: 10.1109/72.80202.
- [16] Ramírez J., Valenzuela O., Rojas F., Herrera L.J., Pomares H., Rojas I. (2020) Power Transformer Forecasting in Smart Grids Using NARX Neural Networks, *2019 Conference Theory and Applications of Time Series Analysis (ITISE 2019)*,835-842 Springer, [https://doi.org/10.1007/978-3-030-56219-9\\_26](https://doi.org/10.1007/978-3-030-56219-9_26)
- [17] Scales, L. E., (1985), Introduction to non-linear optimization, Springer-Verla, New York ,243,doi: 10.1007/978-1-349-17741-7

Стаття надійшла до редакції 20.01.2022

## ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА В УСЛОВИЯХ НЕИНВАЗИВНОГО МОНИТОРИНГА

- РЕВА І.В. аспірант, кафедри систем електропостачання та енергетичного менеджмента Кременчуцького національного університету ім. Михайла Остроградського, Кременчук, Україна, e-mail: cgdizainer@gmail.com;
- ТОДОРОВ О.В. аспірант, кафедри систем електропостачання та енергетичного менеджмента Кременчуцького національного університету ім. Михайла Остроградського, Кременчук, Україна, e-mail: olehtodorov@gmail.com;
- БЕЗЗУБ М.А. аспірант, кафедри систем електропостачання та енергетичного менеджмента Кременчуцького національного університету ім. Михайла Остроградського, Кременчук, Україна, e-mail: bezzubmax@gmail.com;

**Цель работы.** Применение аппарата специально построенной нейросети с задачей идентификации схемы замещения параметров в условиях неинвазивного мониторинга.

**Методы исследования.** Использование методов электрических измерений методом неинвазивного мониторинга, методов идентификации и обучения нейронных сетей, основанных на погрешности переднего и обратного распространения, сетей типа NARX.

**Полученные результаты.** Силовой трансформатор важный объект энергетической системы электрической цеховой подстанции. При этом возможны частые переходы от режима недогрузки к частичной перегрузке, что создает предпосылки к развитию нежелательных явлений в трансформаторах. Мониторинг силового трансформатора базируясь на контроле его схемы замещения, позволяет перейти к контролю его основных параметров в независимости от рабочего режима. Неинвазивный мониторинг хорошо справляется в контексте поставленной задачи, ведь как показывают исследования параметры напряжения и тока, которым оперирует хорошо отражающие в себе зависимость от изменения параметров схемы замещения. Опираясь на Т эквивалентную схему замещения можно выявить и спрогнозировать изменения параметров схемы замещения в соответствии с параметрами режима токов и напряжений, протекающих в этой системе. Многие нейронные сети обрабатывают расчет электрических и электротехнических эквивалентных схем как задачу идентификации параметров электрических цепей в условиях статических режимов. Проведенный эксперимент позволил получить данные для сравнения эффективности различных архитектур нейросетей по отношению с реальными параметрами схемы замещения. Конкретизируя полученные результаты говорим, что архитектура NARX способна к идентификации параметров в стандартных режимах для всех элементов схемы замещения, что в дальнейшем открывает возможности для ее совершенствования в расчете нелинейных элементов трансформатора при работе в состоянии насыщения.

**Научна новизна.** Установлено, что нейросети исследованные в работе способны определять параметры схемы замещения трансформатора или электрической машины в статических рабочих режимах, что позволяет в дальнейшем контролировать состояние обмоток и магнитопровода в соответствии с их значениями.

**Практическая ценность.** Применяя в системе мониторинга нейронной сети позволяет получить четкие значения параметров схемы замещения независимо от режима, предложенный метод значительно уменьшает количество времени затраченной на мониторинг параметров трансформатора, позволяет контролировать уровень мощности, а также при необходимости уменьшить количество необходимой информации для мониторинга трансформатора.

**Ключевые слова:** мониторинг трансформатора; неинвазивный мониторинг; нейронная сеть; идентификация параметров схемы замещения; Т подобна схема замещения трансформатора.

## APPLICATION OF A NEURAL NETWORK FOR DETERMINING THE PARAMETERS OF A TRANSFORMER ELIMINATION CIRCUIT UNDER THE CONDITIONS OF NON-INVASIVE MONITORING

- REVA I.V. PhD student, Department of electricity consumption system and power management of the Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi national university, Kremenchuk, Ukraine, e-mail:

cgdizainer@gmail.com;

**TODOROV O.V.** PhD student, Department of electricity consumption system and power management of the Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi national university, Kremenchuk, Ukraine, e-mail: oledtodorov@gmail.com;

**BEZZUB M.A.** PhD student, Department of electricity consumption system and power management of the Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi national university, Kremenchuk, Ukraine, e-mail: bezzubmax@gmail.com;

**Purpose.** Application of a specially constructed neural network with the task of identifying the parameter substitution scheme in non-invasive monitoring conditions.

**Methodology.** Use of electrical measurement methods by non-invasive monitoring, methods of identification and training of neural networks based on anterior and back propagation error, NARX networks.

**Findings.** The power transformer is an important object of the power system of the electric shop substation. At the same time, frequent transitions from underload to partial overload mode are possible, which creates preconditions for the development of undesirable phenomena in transformers. Monitoring of the power transformer based on control of its substitution scheme, allows to pass to control of its basic parameters irrespective of an operating mode. Non-invasive monitoring works well in the context of the task, because research shows that the parameters of voltage and current, which it operates well reflect the dependence on changes in the parameters of the substitution scheme. Based on  $T$  equivalent the substitution scheme can detect and predict changes in parameters substitution schemes according to the parameters of the current and voltage regime flowing in this system. Many neural networks will work out the calculation of electrical and electrotechnical equivalent circuits as a task of identifying the parameters of electrical circuits in static conditions. In the process of identification, the ability of neural networks of different designs to identify one of the substitution scheme parameters, to resist damage was tested, which corrected the value of an unknown parameter. The experiment made it possible to obtain data for comparing the effectiveness of various architectures of neural networks in relation to the real parameters of the equivalent circuit. Concretizing the obtained results, we say that the NARX architecture is able to identify parameters in standard modes for all elements of the substitution circuit, which further opens up opportunities for its improvement in the calculation of nonlinear elements of the transformer when operating in a saturated state.

**Originality.** It is established that the neural boundaries studied in the work are able to determine the parameters of the replacement circuit of a transformer or electric machine in static operating modes, which allows in the future to monitor the state of windings and magnetic circuit according to their values.

**Practical value.** Using a neural network in the monitoring system allows you to get clear values of the equivalent circuit parameters, regardless of the mode, the proposed method significantly reduces the amount of time spent on monitoring the transformer parameters, allows you to control the power level, and, if necessary, reduce the amount of information required for the transformer monitoring.

**Keywords:** transformer monitoring; non-invasive monitoring; neural network; identification of the substitution scheme parameters;  $T$  is a similar transformer replacement scheme

## REFERENCES

- [1] Montana, Johnny & Candelo-Becerra, John & Racines, Diana. (2018). Non-Intrusive Electrical Load Monitoring System Applying Neural Networks with Combined Steady-State Electrical Variables. Tehnicki Vjesnik. 25. 1321-1329. 10.17559/TV-20170317203817..
- [2] Mohanty, A. R. (2015). Machinery condition monitoring: principles and practices. <http://www.crcnetbase.com/isbn/9781466593053..>
- [3] Li, Zongbo, Zaibin Jiao, and Anyang He. "Knowledge-based Artificial Neural Network for Power Transformer Protection." Iet Generation, Transmission & Distribution. 14.24 (2020): 5782-5791. Print.
- [4] D. Reeve and B. Barton Low Voltage Monitoring ,Primer and Guideline,October 2020,p113, <https://www.ena.org.nz/resources/publications/document/805>
- [5] G. M. V. Zambrano, A. C. Ferreira and L. P. Caloba, "Power transformer equivalent circuit identification by artificial neural network using frequency response analysis," 2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2006, pp. 6 pp.-, doi: 10.1109/PES.2006.1708931.
- [6] Minin, Alexey & Chistyakov, Yury & Kholodova, E. & Zimmermann, Hans & Knoll, A.. (2012). Complex-valued open recurrent neural network for power transformer modeling. Int. J. Appl. Math. Inform. Issue 1, Volume 6, 2012 6. pp41-48.

- [7] Kuczmann, M., Szűcs, A., Kovács, G. "Transformer Model Identification by Ārtap: A Benchmark Problem", *Periodica Polytechnica Electrical Engineering and Computer Science*, 65(2), pp. 123–130, 2021. <https://doi.org/10.3311/PPee.17606>
- [8] Abdelaziz, Almoataz Y, Aleem S. H. E. Abdel, and Anamika Yadav. *Artificial Intelligence Applications in Electrical Transmission and Distribution Systems Protection.*, 2022. Internet resource.
- [9] M. I. Abdelwanis, A. Abaza, R. A. El-Sehiemy, M. N. Ibrahim and H. Rezk, "Parameter Estimation of Electric Power Transformers Using Coyote Optimization Algorithm With Experimental Verification," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 50036-50044, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2978398..
- [10] C. A. Arenas-Acuña, J. A. Rodriguez-Contreras, O. D. Montoya, and E. Rivas-Trujillo, "Black-Hole Optimization Applied to the Parametric Estimation in Distribution Transformers Considering Voltage and Current Measures," *Computers*, vol. 10, no. 10, p. 124, Oct. 2021 [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.3390/computers10100124>
- [11] Z. O. Çetin, A. Dalcalı, F. Temurtaş, A comparative study on parameters estimation of squirrel cage induction motors using neural networks with unmemorized training, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, Volume 23, Issue 5, 2020, p.1126-1133, doi.org/10.1016/j.jestch.2020.03.011.
- [12] Andrejevic Stosovic, Miona & Litovski, Vanco. (2003). *Electronic circuit modeling using artificial neural network.* Journal of Automatic Control. 13. 10.2298/JAC0301031A.
- [13] Jin, Z. and Kaba, S. (2021) Deep Neural Network Based Behavioral Model of Nonlinear Circuits. *Journal of Applied Mathematics and Physics*, 9, 403-412. doi: 10.4236/jamp.2021.93028.
- [14] G. Stegmayer, "Volterra series and neural networks to model an electronic device nonlinear behavior," 2004 IEEE International Joint Conference on Neural Networks (IEEE Cat. No.04CH37541), 2004, pp. 2907-2910 vol.4, doi: 10.1109/IJCNN.2004.1381123.
- [15] K. S. Narendra and K. Parthasarathy, "Identification and control of dynamical systems using neural networks," in *IEEE Transactions on Neural Networks*, vol. 1, no. 1, pp. 4-27, March 1990, doi: 10.1109/72.80202.
- [16] Ramírez J. et al. (2020) Power Transformer Forecasting in Smart Grids Using NARX Neural Networks. In: Valenzuela O., Rojas F., Herrera L.J., Pomares H., Rojas I. (eds) *Theory and Applications of Time Series Analysis. ITISE 2019. Contributions to Statistics.* Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-56219-9\\_26](https://doi.org/10.1007/978-3-030-56219-9_26)
- [17] Scales, L. E. *Introduction to non-linear optimization / L.E. Scales* Springer-Verlag New York 1985

## ОГЛЯД ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕТОДІВ ТА СИСТЕМ МОНІТОРИНГУ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ В СЕРЕДОВИЩІ SMART GRID

- РЕВА І.В. аспірант, кафедри систем електроспоживання та енергетичного менеджменту Кременчуцького національного університету ім. Михайла Остроградського, Кременчук, Україна, e-mail: cgdizainer@gmail.com;
- БЯЛОБРЖЕСЬКИЙ О.В. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри систем електроспоживання та енергетичного менеджменту Кременчуцького національного університету ім. Михайла Остроградського, Кременчук, Україна, e-mail: seemal@kdu.edu.ua;
- ТОДОРОВ О.В. аспірант, кафедри систем електроспоживання та енергетичного менеджменту Кременчуцького національного університету ім. Михайла Остроградського, Кременчук, Україна, e-mail: olehtodorov@gmail.com;
- БЕЗЗУБ М.А. аспірант, кафедри систем електроспоживання та енергетичного менеджменту Кременчуцького національного університету ім. Михайла Остроградського, Кременчук, Україна, e-mail: bezzubmax@gmail.com;

**Мета роботи.** Застосування аналітичного аналізу наявних на практиці методів моніторингу силового трансформатора задля класифікації та систематизації наявної інформації для виявлення раціональних, із позиції експлуатованого електричного вимірювального обладнання трансформаторних підстанцій.

**Методи дослідження.** Використання методів аналітичної класифікації та систематизації наявних методів моніторингу, в полі практичних досліджень та отриманих польових результатів.

**Отримані результати.** Силкові трансформатори залишається серцем енергомережі та мережі Smart Grid будь-якого рівня ієрархії структури та архітектури. Як правило трансформатор як коштотристий елемент мережі вводять в експлуатацію один раз і тримають його в робочих навантаженнях, чередуючи моніторинг та планові відновлювальні роботи, до повної втрати ним робочого стану, необхідного до вимог функціонування. Тому більшість трансформаторів знаходяться в експлуатації понад регламентованій нормовану документациєю період в понад 20 років. Проводячи в необхідності гнучкій аналітичній оцінці та класифікації наявних уже методів моніторингу силового трансформатора, систематизації відомої інформації для більш широкого кола спеціалістів енергетичної галузі.

**Наукова новизна.** Встановлено, що через складність сучасних методів моніторингу необхідний час на їх вибір та використання відповідно до структури трансформатора зменшується із збільшенням систематизації та класифікації відповідного методологічного матеріалу. Представлена систематизація зменшує витрату часу та матеріальних ресурсів при виборі необхідного методу моніторингу силового трансформатора.

**Практична цінність.** Систематизаційна класифікація наявних методів моніторингу в відповідній привязці до сімей методів та зон моніторингового монтування для пошуку сигналу трансформаторних відмов.

**Ключові слова:** силовий трансформатор; методи моніторингу; класифікація методів; структуризація; діагностика; діагностика трансформатора; аналіз методологій.

### I. ВСТУП

Силкові трансформатори залишаються серцем енергомережі та мережі Smart Grid [1] будь-якого рівня ієрархії, структури та архітектури. Із приходом Smart Grid ускладнився контроль та звязки між елементами та присутнім в них функціоналом. Збільшилася увага до таких понять узагальнюючих технологій як Transformer Monitoring Systems [2] як ніша інтелектуального обладнання, а з ним фокус на стан самого трансформатора залежить від робочого середовища, кваліфікації робочого персоналу та частоти попереднього обслуговування. За результатами досліджень [3], у більшості трансформаторів проявлення неполадок (аномалій) та виникнення аварій у активних вузлах відбувається у діапазоні від 30-49 років служби.

Це поломки обмоток спричинені різними типами замикань, пробій ізоляційних матеріалів, спричинених роботою в змінних режимах що супроводжуються температурним навантаженням із зміною хімічних властивостей матеріалу ізолятора. В якому відбувається пробій вивідних втулок ізолятора. Також відбувається погіршення якості контактних з'єднань та механізму РПН, що посилюють нерівномірні навантаження та вібрації трансформатора. З метою протидії розвитку деструктивних сценаріїв що спричиняють вищезазвані несправності проводиться моніторинг силового трансформатора. Відповідно до стандарту ISO 18095:2018 [4] моніторинг трансформатора проводиться контролем електричних, механічних, хімічних, енергетичних чи інших фізичних параметрів за будь-якого з'єднання обмоток та типу трансформатора від-

повідно внутрішній моніторинг останніх регламентує стандарт IEEE C57 [5] та IEC 60076 [6]. За даними стандартами розраховують верхню граничну температуру масла, температуру гарячих плям та термін служби ізоляції трансформатора на основі емпіричних формул. Що дозволяє визначити плив температури та зниження терміну життя ізоляції на збереження життєвого циклу трансформатору. Кожний із них має в своєму складі суттєві розбіжності в технічному виконанні, вимірюваних параметрах та розрахованих даних, трактуванні результатів, можливості монтажу, тощо. Виникає необхідність в класифікації наявних методів моніторингу силового трансформатора, систематизації відомої інформації.

## II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Авторами робилися спроби описати робочі методи моніторингу трансформаторів, що спостерігаються з початку 2000 коли автор роботи [7] описав уразливі функціональні частини трансформатора та вказав на методи діагностики що ґрунтуються на моніторингу параметрів масла, таких як температура та кількість частотних розрядів, електричної цілісності при контролі струму та напруги ізоляції. Що були випробуванні в робочих режимах. Автор виділяє методи, що здійснюють контроль параметрів виводів втулок за допомогою коефіцієнта потужності та методу ємності С. Основним принципом методу є рівність суми струмів до нуля при симетричній трифазній системі, при цьому аналіз стану виводу здійснюється за виміряними значеннями струмів, що перевіряються векторним значенням додавання струмів отриманих із ємності або розрахованих як коефіцієнти потужності. Для перевірки маслонаповнених трансформаторів під навантаженням автор фокусує свою увагу на методи частотного розряду та методи контролю тиску частного розряду для баку (танку) трансформатора. Крім цього значне охоплення мають методи діагностики механічних частин трансформатора, особливо під навантаженням. Однак дані результатів та параметри, що отримані в умовах моніторингу механічних частин суттєво відрізняються для різних типів конструкцій трансформаторів. Що ускладнює уніфікацію в їх трактуванні результатів на різних підстанціях. Цих проблем позбавлені методи термічного контролю (вимірювання диференційної температури, диференційної температури із установленим значенням межі та температурного індексу та методи вібро-акустичного моніторингу, що базуються на записі сигналу акустичної хвилі роботи трансформатора та порівняння його з середнім зразком в розділі двох смуг частот, де на високих діапазонах виявляються електричні проблеми, а на низьких механічні в зоні РПН трансформатора. Авторами [8] розглянуто практичну реалізацію методів DGA, RVM, Insulation Resistance, Polarization Index в умовах роботи трансформатора під навантаженням, виявлено наявність недоліків, в особливості не проаналізовано наявні методи моніторингу при його роботі в режимах відключення від мережі (Off-Line).

Даної проблеми позбавлена робота [9] де було систематизовано ієрархічну структуру та наявні методи відповідно до зони використання, де були розглянуті та описані, а також проведено розділення більшості електричних методів базованих на параметрах струму в підгрупи. Автор констатує що на практиці застосування аналізу газу (DGA) залишається релевантним, адже метод може ідентифікувати близько 70 відсотків наявних несправностей, поряд із тим автор підкреслює що незважаючи на появу нових методів діагностики таких як: вимірювання імпульсу часткового розряду PD високочастотним трансформатором струму (HFCT)[10], методи аналізу частотно-домених структур, такі як частотна спектроскопія (FDS), Аналіз частотної характеристики розгортки (SFRA) більшість результатів отриманих в реальних умовах складно трактувати одним результатом, що створює труднощі при створенні узагальнюючих стандартів для даних методів. Автор аналізує вимірювально-розрахункові методи моніторингу параметрів трансформатора, проте не розглядає альтернативних методів моніторингу із більшою точністю в оцінці параметрів. Також слід зазначити, що розглянутий метод ґрунтується на акустичному моніторинзі і розрахований лише для часткового розряду, що ускладнює його застосування для інших параметрів та методів в описі електричної підгрупи. Які наявні за твердженнями [10] як підгрупа акустичних методів, що застосовні для трансформаторів малої та середньої потужності як засоби ефективно моніторингу процесів пов'язаних із старінням трансформатора. Для методів акустичного дослідження часткових розрядів, автор виділяє методику знаття параметру коефіцієнту мел-частотного кепстру частотної області (MFCC) та лінійне прогнозування з кодовим збудженням (CELP). В даній роботі концентрується лише на актуальних лабораторних методах, не беручи до уваги гібридні методи, що поєднують в собі математичні розрахунки та комп'ютерний інтелект.

Автори [11] описали гібридні методи на основі FRA, DGA, SCI при поєднанні із методами розрахунку оптимізації рою частинок (PSO), провели експерименти на моделях із індифікацією параметрів за допомогою підходу поєднання алгоритмів машинного навчання. Таких як (KNN) k найближчих сусідів, (SVM) метод опорних векторів, що в сукупності надає можливість гібридного методу моніторингу із штучним інтелектом. Котрий концентрується лише на зоні масляного баку, обмоток та РПН трансформатора не приймаючи до уваги механічні частини, втулки (виводів). Розглядаючи лише частину активних частин конструкції трансформатора, при цьому не розглядалось використання АНН мереж для більш оптимізованих у часі та ресурсах методів розрахунку.

Автори [12] вдосконалили метод візуального огляду несправностей та моніторингу, інтегруючи CNN що базуючись на нейронних мережах на базі комп'ютерного розпізнавання зображень пошко-



джен трансформаторної обмотки використовуючи алгоритми глибокого навчання. Показники наведених вище методів можуть бути трактовані із суперечливи результатами. Проблемою багатьох методів є наявність різного трактування стандартів, відповідно при цьому для кожного типу конструкції трансформатора не завжди кореткно можна дати оцінку оперативному стану обладнання під час обочого режиму. Автори [13] здійснили систематизацію застосованих на практиці електричних методів діагностики за 10 діагностичними техніками, однак не розкрили їх відповідність режимам роботи трансформатора що застосовуються в системах моніторингу трансформатора таким чином, узагальнена класифікація методів діагностики стану трансформаторів для задач моніторингу, з використанням наявного електровимірювального обладнання трансформаторних підстанцій відсутня.

### III. МЕТА РОБОТИ

Метою роботи є аналіз застосованих на практиці методів моніторингу силового трансформатора, для виявлення раціональних, із позиції експлуатованого електричного вимірювального обладнання трансформаторних підстанцій.

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

Моніторинг силового трансформатора представлений комплексними системними продуктами, суттєво відмінними по функціоналу, призначенню, ціновому діапазону. Системи контролю та стану трансформатора розділяються у своїй роботі на складні та прості. Складні для кожної його конструктивної частини із інтегрованими датчиками для передачі сигналів чи параметрів явищ, протікаючих в режимі активної роботи. Прості системи для контролю параметрів живлячої мережі трансформатора чи захисних реле трансформатора.

Результат моніторингу трансформатора – досягнення експлуатаційної та технічно-обслуговуючої оптимізації. При цьому шлях досягнення контролю над явищам та електромагнітними процесами, здійснюється за рахунок та в режимі роботи під навантаженням (On-Line). При цьому в кожній його активній частині конструкції сигналізація відбувається при умовах нормованого та межового відхилення контрольованих параметрів періоді їх виявлення з метою недопущення виникнення неполадок та поломок, що

приведуть до непоправних матеріальних втрат. Автором [14] виділяється 4 основні вимоги до систем сучасних систем високовольтного обладнання як трансформатор. По-перше функція первинного інформування від датчиків, що контролюють поточний стан трансформатора до комп'ютера оператора чи регістратора SCADA: інформування про зміну консинстенції масла, ймовірність частотного розряду, температурну градацію активних точок обмоток. По-друге функцію контролю навантаження та режиму роботи трансформатора, що залежать від якості та характеру споживача. По-третє контроль параметрів розумної енергосистеми в якій знаходиться трансформатор, стеження за перебігом перехідного процесу. По-четверте оптимальна оцінка конструкції трансформатора, за рахунок математичних моделей та характеристик відображаючи процеси, що протікають в трансформаторі, на основі яких система моніторингу проводить оцінку стану трансформатора.

Розглядаючи силовий трансформатор в процесі роботи та моніторингу деструктивних явищ та процесів, що проявляють себе в його активних частинах, спричиненими впливом старіння (зменшення фізичних та хімічних властивостей матеріалів під дією часу), агресивного робочого середовища. Слід класифікувати та систематизувати зони силового трансформатора як мапа із 5 зон активних частин трансформатора, найбільш уразливих до відпрацювань та поломок. До яких підбирають застосовану на практиці систему методів зібраних та розділених відповідно до застосованого робочого режиму для трансформатора (Режим з навантаженням On-Line і без навантаження Off-Line), з наступним узагальненням відповідно до спільності фізичних ознак методів між собою. Це дозволить гнучко вибирати метод відповідно до вище описаної ієрархічної концепції систематизованої у вигляді блок-схеми.

На (рис.1.) представлена блок-схема де методи розподіляють по категоріях фізичної природи основного процесу чи явища. Наступною особливістю класифікації є відповідність режиму роботи трансформатора як без підключеного навантаження так із підключеним навантаженням. Із урахуванням особливості конструкції трансформатора та його роботи в режимах навантаження, визначення моніторингових параметрів може бути доступним лише для певних методів і короткий час робочого дня..



<b>METHODS FOR ANALYSIS OF TRANSFORMER PARTS</b>	Chemical	Aging-Failures Priority 1		Aging-Failures Priority 2		Aging-Failures Priority 3	
		Off-line	UV/Visible Spectroscopy 1	Off-line	Partial Discharge (PD) IEC C37.301-2009, IEC 60270 1	Thermal On-line	Hot-Spot Point Region 1
			Turbidity Analysis (ASTM Designation 6181) 2		Recovery Voltage Measurements (RVM) 2		Heat Transfer Properties IEC Realisation Std. Method 2
		Combined Gas Chromatograph-Mass Spectrometry (GC-MS) 3	On-line	Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) 4	Polarization and depolarization current (PDC) 3	CIGRE Realisation Std. Method 3	
		Heat Transfer Properties 5		Time-Domain Polarization 4	IEEE Realisation Std. Method 4		
		The acid number (AN) 6	Electrical	Duvals Pentagon 7	Frequency domain Spectroscopy (FDS) 5	ASTM Realisation Std. Method 5	
		Linear vector quantization (LVQ) 8		Sweet Frequency Response Analysis (SFRA) 6	Termo Spectrography 6		
		Interfacial Tension Analyses (IFT) EN 14210 or ASTM D971. 9	On-line	Corrosive and potentially corrosive sulphur (IEC 62535) 10	Impulse Frequency Response Analysis (IFRA) 7	InFRARE thermography test 7	
		IEC 60599 Ratios, Limits and gassing rates 11		Online Frequency Response Analysis (OFRA) 8	Fiber Brag Grating Thermal Sensing 8		
		IEEE C57.104, Limits, rates and total dissolved combustible gas (TDCG) 12	Aging-Failures Priority 4		Low Voltage Impulse (LVI) 9	Acoustic detection PD 1	
		Expert System Monitor 13	Acoustical On-line	Expert System Analysis 14	Short circuit Impedance (SCI) 10	Acoustics Emission (AE)	
		Church Logarithmic Nomograph 15		Dielectric Dissipation Factor (DDF) or Dissipation Factor (DF) or $\delta$ or Dielectric Loss Angle (DLA) 11	Measurement of the time difference of arrival (TDOA) 2		
		Trend Analysis var. source 16	Optical On-line	Glass Criterion 17	Fast Current Transformer (FCT) 12	Standard auscultatory technique (SAT) 3	
		Rogers Ratios 18		Electrostatic Charging Tendency (ECT) 13	Advanced auscultatory technique (AAT) 4		
		Duvals Triangle 19	Aging-Failures Priority 5		Polarization Index (PI) 14	Estimation of the direction of arrival (DOA) 5	
		Key Gas Method 20	Vibration On-line	Trilinear Plot Method 21	Bushing C or Tan $\delta$ 15	Measurements Ultra High Frequency (UHF) signal 6	
		Shanks Visual Curve Method 22		Windings Resistance Test 16	Fiber Brag Grating Optics Sensing 7		
		Absolute limits, various sources 23	Aging-Failures Priority 6		Isolations Resistance Test 17	Acoustics Noise Redaction 8	
		Potthoffs Scheme 24	Optical On-line	Dornenburg Ratios 25	Dynamic Resistance Measurement (DRM) 18	Acoustic Sweet Frequency Response Analysis (SFRA) 9	
		Dornenburg Ratios 25		Statistics Windings Resistance Test 19	Vibration PD 1		
		Incipient Fault types 26	Core to Ground Test 20	Visual Expert Overview 1			
		Oil Moisture 27	Turn Ratio Test 21	Optical Spectrography 2			
		Antioxidant additive content (Inhibitor) 28	Balanced Current 22				
		Particle Count 29	Voltage Phasors 23				
		Oil Color/Visual examination 30	Loss Factor 24				
		Partishes Discharge (PD) 31	Referenced Current Test 25				

Рисунок 1. Таблична структура класифікація методів моніторингу силового трансформатора.

Електричні методи представлені методиками, що застосовуються для електричних та енергетичних процесів та їх параметрів. Що є показниками явищ та процесів що передують поломкам трансформатора таких як: опір, ударна напруга, кут діелектричних втрат, ємність витoku, утвореного в маслонापвненому трансформаторі. Котрі можуть бути ідентифіковані на ранніх етапах на основі різноманітних методів електричної оцінки кількості та типу наявних електричних сигналів.

1) Група методів вимірювання часткових розрядів (англ. Partial Discharge(PD)) метод, що базується на визначенні розряду локалізованого часткового пробую ізоляції PD поступово погіршують стан ізоляції, яка втрачаючи властивості стає вразливою до пробую із присутніми витковими та міжвитковими замиканнями. Задля недопущення критичних пошкоджень цілісність ізоляція ВН обладнання повинна бути підтверджена за допомогою аналізу на частотний заряд PD під час його виготовлення, його введення в експлуатацію та протягом робочих років служби. PD може бути пов'язані з робочою напругою, напругою, індукованою основним магнітним потоком, напругою, індукованою блукаюча струмом. Джерело PD також може впливати на процеси старіння, що призводять до змін стану ізоляції та до незворотної деградації ізоляційних матеріалів. Можна виділити два методи виявлення на основі параметрів близьких до електричних: звичайне вимірювання PD, що базується на вимірі значення імпульсу заряду за заданий проміжок часу та методи для надвисокої частоти (УВЧ). Звичайний електричний спосіб полягає у підключенні датчиків для виміру імпульсу частотного розряду, параметрів та місця розташування його сигналу та система збору та обробки даних. У трансформаторах зазвичай використовуються ємнісні та індуктивні датчики. Вхідний ввід трансформатора використовується як датчик ємнісного зв'язку, а струм вимірюється за допомогою високочастотного трансформатора струму (HFCT). Звичайні вимірювання відповідно до IEC 60270, використовують звичайний метод у випадках відомого знаходження видимого заряду, вимірюваний в рС, який представляє інтегрований імпульс струму, викликаний PD. Імпульс струму PD має короткий час наростання і випромінює магнітні хвилі з частотами до від 100 МГц до 2 ГГц діапазонів, отже, електромагнітна хвиля, генерована PD, має частотну складову в діапазоні УВЧ. По мірі поширення імпульсів PD через обмотку трансформатора вони зазнають значних спотворень та загасання. Виявлення сигналу PD для моніторингу трансформатора досягається завдяки чутливості сигналу в відповідній смузі пропускання цього сигналу. На противагу цьому виявлення надвисоких частот (УВЧ) є звичайною та безперервною процедурою моніторингу PD для силових трансформаторів. Цей метод розрахований під сигнал електричний резонанс в діапазон частот від 100 МГц до 2 ГГц для розпізнавання та ідентифікування місце розта-

шування PD. Оскільки датчик встановлений всередині трансформатора, екрануючий ефект бака допомагає придушити будь-які зовнішні шуми. Крім того, низьке ослаблення сигналу в масляній ізоляції та висока чутливість для вимірювання на місці, розширили використання цього методу для тестування трансформаторів.

2) Відомі три методи, згадані до аналізу діелектричної реакції (англ. Dielectric Responce Analyses (DRA)): (1) Вимірювання відновленої (зворотної напруги) (англ. Recovery Voltage Measurment (RVM)), іноді також зване вимірюванням зворотної напруги (RV); Струм поляризації та деполаризації (англ. Polarization and Depolarization Current (PDC)); Спектроскопія частотної області (англ. Frequency Domain Spectroscopy (FDS)). Метод відновленої напруги (RVM), - це метод у часовій області для дослідження повільно протікаючих поляризаційних процесів. Стан ізоляції може бути фізично контрольовано різними параметрами вимірювання RV, включаючи максимальну пікову напругу, величину центральної постійної часу та поляризаційний спектр, що відображають рівень наявності вологи в ізоляції. Це найменша неруйнівна діагностична методика полягає у подачі постійної напруги  $U_c$  над електроди повністю розрядженого досліджуваного об'єкта. Як правило, напруга постійного струму становить від 0,5 до 2 кВ застосовується до тестового об'єкта. Протягом періоду зарядки  $T_d$  струм поляризації  $I_{pol}(t)$  тече через тест-об'єкт. Після цього періоду тестовий об'єкт замикається (заземлюється) і деполаризаційні потоки  $I_{depol}(t)$  течуть по провіднику. Проте обидва струми не вимірюються. Після визначеного період розряду  $T_d$ , напруга відновлення,  $UR(t)$  вимірюється при відключенні джерела постійного струму. Після закінчення періоду короткого замикання (заземлення) заряд, обмежений поляризацією, буде перетворююється на вільні заряди, тобто між електродами на діелектрику буде накопичуватися напруга. RV вимірюється в умовах розімкнутого контуру. Послідовність RVM повторюється послідовно для часу зарядки  $T_c$  для значень, що варіюються від 1 до 1200 с. Використовуване співвідношення часу зарядки та часу розрядки ( $T_c/T_d$ ) дорівнює 2. Отримана крива,  $U_{max}$  як функція  $T_c$ , називається спектром поляризації. Початкова похідна ( $Sr=dUR/dt$ ) відновлювальної напруги також знайдена і може бути побудована як функція  $T_c$ . Однак кілька дослідників повідомляли, що RVM являє собою складну сукупність індивідуальних ефектів нафти та паперу та їх вологи та умов старіння. Вміст вологи в твердій ізоляції впливає і на цей «спектр», але це не можна відокремити від провідності масла.

3) Метод Струм поляризації та деполаризації (англ. Polarization and Depolarization Current(PDC))[15] - метод де ступінчаста напруга постійного струму прикладається до повністю розрядженого трансформатору від поляризаційного струму (pA) після чого, вимірюється та записується через деякий час. Тоді система ізоляції замикається і струм деполаризації є

вимірюю та фіксується. Ці виміряні зарядні та розрядні струми порівнюються з лабораторними моделями для інтерпретації. Результати можна трансформувати з часової області в частотний домен, якщо потрібно для порівняння з FDS результатом, і навпаки. Трансформація до частотної області виконується, наприклад, коли метод PDC є у поєднанні з методом FDS. У випадках, коли вимірюється лише струм поляризації (PDC) отримується дуже низькочастотна інформація при цьому виконуються вимірювання FDS для набуття високочастотних діелектричних характеристик. Метод також має недолік, як обмежений діапазон частот для вимірювання, що не містять жодної інформації на вищому рівні частоти через кінцевий час наростання імпульсу постійного струму.

5) Метод Спектроскопія частотної області (англ. Frequency domain Spectroscopy (FDS) – тест-метод що базується на записі сигналу відгуку реакція ізоляції, яка піддається впливу змінної напруги на послідовних частотах, це діапазон від 1 кГц до 1 мГц, що підходить для більшості трансформаторів. Метод FDS багаточастотний тестовий сигнал на низьких частотах. Звичайний підхід FDS передбачає використання однієї частоти тестового сигналу для кожного вимірювання послідовних та нижчих вимірюваних частот, які поступово збільшуються з часом. Це нове рішення для багаточастотного тестування скорочує загальний час вимірювання, вимірюючи кілька синусоїдальних коливань одночасно за допомогою дискретного перетворення Фур'є, розділивши окремі коливання в частотну область. Єдиний і помітний недолік вимірювання FDS є його сукупний час вимірювання на низьких частотах, де інформація про вологість є важливою.

Група методів Частотного Аналізу (Характеристик) розгортки (англ. Frequency Response Analysis (FRA)) - це потужний інструмент для вдосконалених оцінок силових трансформаторів для оцінки механічної або електричної цілісності сердечника та обмоток шляхом вимірювання електричних передавальних функцій у широкому діапазоні частот. Результати можна порівняти з результатами традиційних випробувань, таких як трансформатор коефіцієнт повороту (TTR), опір обмотки або опір витoku. Відповідно до характеру вхідного сигналу, існує два основні методи вимірювання: аналіз частотно-імпульсної характеристики (IFRA) та методи аналізу частотних характеристик з розверткою (SFRA). У методах IFRA використовується один неперіодичний сигнал як введення або вхід, який вводиться в будь-який з доступних терміналів трансформаторів.

Метод вимірювання частотно-синусоїдної характеристики з розверткою (англ. Sweep Frequency Response Analysis (SFRA) - метод при якому сигнал збудження що подається на вхід представляє собою синусоїдальний сигнал з амплітудною низької напруги (зазвичай в діапазоні 1–20 В), який подається на вивід трансформатора при розверненні частот (в діапазоні

від Гц в мГц). При цьому розраховується їх передаточна функція (TF), що отримується із відношення виходу на вхід для різних частот. Однією з основних проблем, пов'язаних із SFRA, є обмеження його ефективного тестування з моменту використання метод, вимагає введення тестового сигналу в обмотки трансформатора через високовольтні втулки.

6) Аналіз частотно-імпульсної характеристики (англ. Impulse Frequency Response Analysis IFRA). Методика IFRA дуже швидка (вимагається всього кілька хвилин), на відміну SFRA досить тривала (близько 2 годин), що полягає у введенні імпульсу в кожну фазу обмотки ВН та НН в умовах що обмотки розвантажені. Посилаючи сигнал вхідного імпульсу та знімаючи вихідний імпульс фіксуються дані, що можуть свідчити про зміну форми параметрів кривих обмоток. Результати часової області трансформуються у частоту домен за допомогою алгоритмів швидкого перетворення Фур'є (ШПФ).  $U_{in}$  та  $U_{out}$  розраховані для різні частоти. Для обох методів для кожної частоти обчислюється співвідношення  $20\log(U_{out}/U_{in})$  (в дБ). Вимірювання можуть зафіксувати унікальний «відбиток» трансформатора, який можна порівняти з попереднім виміром. Відмінності між ними вказують на те, що механічні та електричні зміни, відбулися всередині трансформатора. Для кожної несправності, вимірюється імпеданс передачі та порівнюється з вихідною частотною характеристикою без дефектів.

Онлайн Аналіз частотно-імпульсної характеристики (англ. Online Frequency Response Analysis OFRA) - Знову ж таки, онлайн-підписи IFRA вимірювались та обчислювались на основі алгоритмів ШПФ та Complex Continuous wavelet transform CCWT[16] від перехідних сигналів. Результат аналізу показав, що підпис на основі CCWT набагато чіткіший, ніж підпис на основі ШПФ, а інформація основних резонансних точок не спотворюється, що свідчить про перевагу запропонованого способу. У експерименті з дефектом деформації з емульованою обмоткою трансформатора, автономні підписи SFRA та онлайн-підписи IFRA здорові і несправні були отримані та порівняні. Результат вказує на те, що деформація обмотки ефективно виявляється за допомогою онлайн-методу IFRA з CCWT алгоритм.

8) Тест подачі імпульсу низької напруги (англ. Low Voltage Impulse (LVI) - метод заснований на подачі імпульсу короткої низької напруги до однієї обмотки із записом прикладеного імпульсу і ємнісно пов'язаного струму на іншій обмотці або струмі обмотки або вихідної напруги. Зміни ємності між обмотками як зміни ємностей міжобертових обмоток (включані рухом обмотки) відображаються на зміні форми хвилі вимірюваного струму або напруги. Накопичений досвід на місцях показує що LVI є дуже чутливою методикою для виявлення рухів обмотки. Як правило, випробування LVI вимагає відключення та ізоляції трансформатора від системи. Якщо тест можна зробити онлайн, це було б можливо простіше у вико-

нанні за нижчою вартістю, і це може бути робитися частіше. Це зробить можливим виявити тенденції стану трансформатора і виявити проблеми раніше. Майбутніми авторами представлені модифікованого методу LVP [17]. Перевірка можливості визначення незначних змін в геометрії обмоток викликає значні експериментальні труднощі: це трудомістко і призводить до великих економічних втрат. Кращий спосіб отримати дані про потенційні механічні дефекти можна отримати за допомогою як фізичної моделі трансформатора або шляхом моделювання - моделюючи різні ситуації, пов'язані з дефектами обмотки.

9) Метод коротзамкнутого імпедансу (англ. Short circuit Impedance (SCI)[18] - це традиційний метод виявлення деформації обмотки і осердя. зміщення трансформатора. У тесті SCI напруга зазвичай подається на обмотку ВН і обмотка НН замкнута накоротко. Стаючи основною складовою напруги і струму, прикладеного до Обмотка ВН - це SCI тестованого трансформатора. Оскільки SCI залежить від геометрії обмотки, зміна геометрії обмотки через деформацію призведе до відхилення SCI. Стандартний IEEE std. C57.62, передбачає, що обмотку трансформатора слід розглядати як значну, якщо зміни SCI складають більш  $\pm 3\%$  в порівнянні із заводською табличкою. Розгортка метод частотного імпедансу (SFI), який розроблений з використанням переваг методів SCI і FRA вперше були застосовані для вивчення коротких замикань внутрішніх обмоток трансформатор власної розробки. Хоча отримані форми цих двох методів різні, значення обох результатів залежать тільки від конструктивних параметрів трансформаторної обмотки і обидва методи можуть використовуватися для діагностики стану трансформатора. Друга відмінність полягає в тому, що значення SCI, отримане за допомогою тесту SFI, можна розглядати як діагностичний критерій, але тест FRA не забезпечує цієї важливої функції.

11) Група методів Діелектричного дисипаційного фактору, Фатор Дисипації б Дельта або Діелектричний Кут Втрат англ. Dielectric Dissipation Factor (DDF) чи Dissipation Factor (DF) чи  $\tan \delta$  чи Dielectric Loss Angle (DLA) - методи для оцінки стану втулки. Це випробування зазвичай проводиться при напрузі 10 кВ для втулки на місці вимірювання. Ємність С і DDF діелектрика є складною функцією принаймні двох змінних – частоти і температури, хоча вологість і тиск можуть бути іншими фізичними змінними. Випробовують напругу, тому її характеристики та температура повинні реєструватися. Результати тесту DDF слід порівняти до значень шильдиків або попередніх випробувань. При цьому традиційна Off-line-діагностика має два недоліки: вимірювання проводяться дуже тривалі часові інтервали, які, безумовно, занадто довгі для виявлення прогресуючого розвитку відмови. Крім того, висновки є непрямими, особливо коефіцієнт дисипації  $\tan \delta$  попри робочу температуру не можна виміряти безпосередньо. Тому постійний

нагляд відповідно On-line моніторинг ємності С та коефіцієнта дисипації  $\tan \delta$  при робочій температурі є найбільш бажаним.

12) Метод Швидкого струмного перетворення (англ. Fast Current Transform (FCT) – метод, що ґрунтується на подачі сигналу низької напруги як вхідної точки під час вимірювання функцій передачі в режимі On-line на втулку високої напруги трансформатора. При цьому ємнісне значення втулки залишається відносно постійним у широкому діапазоні частот, фактичний підпис трансформатора не буде забруднений або замаскований через власну частотну характеристику втулки Під час тестування короткозамкнута вилка замінюється індуктором для утворення фільтра низьких частот. Тестові сигнали в діапазоні від 200 кГц до 2,5 МГц подаються у втулку. Для трансформатора з підключенням зірка функція передачі в режимі On-line вимірюється введенням сигналу у фазовому втулку, а реакція записується через вивід нейтральної втулки. Для трансформатора з трикутним з'єднанням відгук вимірюється між двома фазами.

13) Метод виміру параметру Тенденція електро-статичного заряджання (англ. Electrostatic Charging Tendency (ECT) - метод, що ґрунтується на вимірі параметру електростатичного заряджання (ECT), що зростає із збільшенням потоку масла потокового струму. Спостерігалась пряма залежність між ECT та старінням. В останніх роботах було встановлено, що вміст розчинених продуктів розпаду і зважені частинки також є чинниками, що сприяють вимірювання ECT в силових трансформаторах досі є настільки ж важливим. Оскільки на ECT впливає об'ємний опір, часткові розряди (PD) та діелектричні втрати, ємнісний датчиком було запропоновано оцінити поведінку силового трансформатора щодо електричної та електричної небезпеки. Цей ємнісний датчик призначений для On-line - моніторингу небезпеки в трансформаторі. Одним із найбільш часто застосовуваних для вимірювань є міні-статичний тестер (MST). Однак протокол MST не враховує а кількість факторів, які можуть вплинути на ECT, таких як повітря та швидкість введення. Ось чому деякі модифікації були зроблені різними авторами для підвищення точності протоколу та забезпечення відтворюваність вимірювань.

14) Метод виміру Індекс поляризації (англ. Polarization Index (PI) Індекс ПІ - це відношення опору ізоляції, виміряний після подачі напруги протягом 10 хв ( $R_{10}$ ), до  $R_{60}$ , виміряного лише через одну хвилини ( $R_1$ ). Цей показник, незалежно від температури, був введений для виявлення забруднених або мокрих обертових машин, що намотують ізоляцію. ОІ та ПІ використовувались електроенергетикою для тривалого часу для встановлення стану вологі трансформатора. Польові вимірювання зазвичай проводяться відразу після знеструмування трансформатора. Таким чином на місці вимірювань, зазвичай відбувається міграція води, трансформатор знаходиться в нерівноважному стані. За таких обставин великі теплові коливання

можуть вплинути на результати, оскільки розподіл вологи всередині ізоляція знаходиться не в повному рівноважному стані.

16) Метод-тест виміру опору обмотки трансформатора (англ. Windings Resistance Test) – метод виміру опору обмотки трансформатора що ґрунтується на розрахунку втрат провідника обмотки  $I^2R$ , де  $I$  - номінальний струм обмотки в амперах, а  $R$  - вимірний опір обмотки постійного струму. Як тип використовуються вимірювання опору обмотки тест, а також звичайний тест. Для подальшого порівняння слід записати температуру вимірювання та опір переведений в еталонну температуру. Варіація більше 5% може свідчити про пошкодження обмоток. Опір обмотки трансформатора можна виміряти або методом вольтметр-амперметр, або мостовим методом. Стандарт IEEE Std C57.12.90 вказує на те, що метод мосту повинен застосовуватися у випадках, коли номінальний струм обмотки трансформатора менше 1А, тоді як вольтметр-амперметр застосовується, коли номінальний струм обмотки трансформатора дорівнює 1А або більше.

17) Метод-тест виміру параметру Опіру Ізоляції (англ. Isolations Resistance Test) - один із традиційних методів, що використовується для визначення погіршення ізоляції трансформатора, сухості або несправності обмоток або заземлення сердечника. Висока напруга постійного струму (типові значення від 1 кВ до 5 кВ) застосовується до випробовуваної обмотки. Вимірюється струм витoku і розраховується ОІ і позначається приладом. У сухому або менш забрудненому трансформаторі резистивний струм витoku малий і постійний. У поганій ізоляції, резистивний струм витoku, який складається з чотирьох різних компонентів (провідність, сміність, поглинання та поверхневі витoki, кожен з яких додає до складеної реакції) досить великий і може з часом збільшуватися. ОІ-профілі здорових систем ізоляції виглядають як зворотня експоненціальна функція за формою через чотири основні складові струму, дві з них зменшуються в геометричній прогресії. Вимірювання проводяться через 1, 2, 5, 50 та 100 хв. Якщо дві послідовні вимірювання дають однакові результати, тест може бути зупинений, а значення використовуються для розрахунку ОІ.

18) Метод Вимірювання Динамічного опору обмотки (англ. Dynamic Resistance Measurement (DRM)-автономний, неруйнівний метод випробування, заснований на струмі постійного струму, що вводиться через обмотку та перемикач під час переміщення по всіх його положеннях. Випробувальний струм записується з високою роздільною здатністю. Крім того, одночасно з випробувальним струмом можна записати струм двигуна РПН. Висока частота дискретизації дуже важлива через швидкі процеси переходу (час переходу резистора типу OLTC становить приблизно 50мс.). Метод DRM зарекомендував себе як дуже ефективний метод для раннього виявлення можливих несправнос-

тей на пристроях РПН під навантаженням (OLTC). Цей тест може бути використаний для виявлення таких проблем, як повільний час переходу, розрив ланцюгів, проблеми з контактами, перехідні резистори, механізм, управління двигуном та багато іншого.

19) Метод Вимірювання Статичного опору (англ. Statistics Windings Resistance Test - Це стандартне випробування проводиться для вимірювання фактичного значення опору обмотки трансформатора та відповідних послідовних компонентів. Статичне вимірювання дає єдине значення, залежне від температури, в Омах.

20) Метод випробувань Сердечник до Землі (англ. Core to Ground Test) - це метод випробування на заземлення сердечника проводиться шляхом від'єднання заземлення сердечника поза резервуаром і від резервуару. Вимірюється ОІ сердечника до землі. Цей тест виконується як звичайне завдання технічного обслуговування для виявлення якщо сердечник змістився, встановивши контакт із його резервуаром, але зазвичай це виконується, коли трансформатор є перший встановлений, переміщений або якщо проблема виявляється аналізом розчиненого газу (Dissolved Gas Analysis DGA) зі збільшенням горючих газів. Типові значення складають близько 10 МОм або вище. Значення нижче 100 кОм можуть вказувати основні проблеми заземлення. У деяких випадках застосовуються опори (зазвичай порядку декількох кОм) до заземлених розділених пакетів для ламінування сердечника. Вимірювання струму заземлення сердечника в режимі експлуатації показують значення порядку мА для добре ізольованого сердечника; якщо сердечник має несправності заземлення, сила струму становить кілька ампер або навіть вище.

21) Метод випробування випробування коефіцієнта обертання трансформатора (англ. Turn Ratio Test) – це випробування коефіцієнта обертання трансформатора проводиться за допомогою введення напруги, фаза за фазою та відведення за допомогою втулки, вимірюючи відповідне відношення напруги для відповідних обмоток, яке порівнюється з очікуваним співвідношенням таблиці на паспорті. Оскільки в 3-фазних силових трансформаторах потрібно мати на увазі групу з'єднань, в деяких конфігураціях коефіцієнт обертання трансформатора повинен розраховуватися з виміряного коефіцієнта напруги за деякими формулами перетворення; струм намагнічування також повинен бути мінімальним, використовуючи низькі напруги в введенні, і таким чином зменшуючи падіння напруги на імпедансі первинної обмотки, що може бути основним джерелом помилок; коротко, обладнання для випробування коефіцієнта обертання силового трансформатора повинно мати спеціальну конструкцію, з особливими експлуатаційними характеристиками та точністю, відповідно до процедури та діапазону.

22) Метод збалансованого струму (англ. Balanced Current) - це метод який також називають методом

суми струмів, є найбільш вживаним сьогодні методом моніторингу втулок.[19] Принцип полягає в тому, що за ідеальних обставин суми струмів витоку трьох втулок різних фаз з урахуванням його фазових кутів дорівнюють нулю. Ідеальні обставини означають, що величина напруги абсолютно однакова, зсув фази між фазами рівно 120 градусів, а втулки всі одного типу і мають всі однакову температуру.

23) Метод виміру фазорів напруги втулок (англ. Voltage Phasors) - Принцип вимірювання базується на так званому методі напруги моніторингу втулок в режимі On-line. Метод не отримав[20] широкого застосування через труднощі з точним вимірюванням фазових векторів напруги на вимірювальних виводах втулки. Це призвело до неточної оцінки  $\tan \delta$ . Переваги цього методу підтверджуються також результатами аналізів, що розглядають можливість вимірювання вищих гармонік лінійних напруг в системах контролю втулок.

24) Метод виміру параметру фактору втрат (англ. Loss Factor) – це метод базується на традиційній Off-line-діагностиці має недоліки: вимірювання проводяться дуже тривалі часові інтервали, які, занадто довгі для виявлення прогресуючого розвитку відмови. Крім того, висновки є непрямими, особливо коефіцієнт дисипації  $\tan \delta$  та робочу температуру не можна виміряти безпосередньо. Тому постійний нагляд відповідно On-line моніторинг ємності C та коефіцієнта дисипації  $\tan \delta$  при робочій температурі є найбільш бажаним. Ці дані містять цінну інформацію: Часткові поломки, які вимагають негайних дій, можуть бути виявлені за зміною простої потужності в момент часткової поломки.

25) Метод-тест струму джерела (англ. Referenced Current Test) – це метод базований на вимірі різниці фаз втулки струмового витоку де еталона напруга буде виміряна та встановлено що  $90^\circ$  - різниця фаз являє собою кут дельти[21]. Виміряна різниця фаз являє собою прямий кут  $\Theta$ . Використовуючи середньоквадратичне значення витоку струму та середньоквадратичне значення фази розраховується напруга ємності.

## V. ВИСНОВКИ

В процесі роботи була сформована таблична класифікація систематизація методів моніторингу активних частин силового трансформатора при яких було встановлено .що найбільш практичними та доступними для аналізу є електричні методи.

Електричні методи базуючись на електричних процесах заряду та розряду, частотної характеристики напруги та струму, вплив частотного розряду є найбільш чутливими до деградації ізоляційного матеріалу в активних частинах силового трансформатора, передбачаючи зміни параметрів, що характеризують проблеми поломок активних частин трансформатора , найбільш вживаним серед них є метод частотного

аналізу SFRA, котрий застосовується і в інших методах для перевірки критичних параметрів. Проблемою більшості електричних методів є те що їх застосування лімітоване часовим діапазоном і при його порушенні може проявитися негативна тенденція до підвищення рівня старіння ізоляції та її передчасного руйнування. Також особливістю електричних методів поряд із чутливістю є великий вплив електромагнітного поля сердечника, що призводить до некоректних результатів у зв'язку із його насиченням і різницею вимірів в різні проміжки дня робочого навантаження. Слід зазначити що багато вчених стверджують що електричні методи вносять електромагнітні шуми, котрі впливають на роботу інших методів таких як акустичні та вібраційні, що ускладнює їх роботу в комплексі із мультитотоковою передачею сигналу і вимагає затрат на встановлення необхідного екранування. Методи частотного аналізу залишаються універсальним інструментом для спостереження за магнітно-електричною системою трансформатора через дороговизну та неможливість застосування в навантаженому режимі конкурентів. Однак нинішній рівень ізолюючих матеріалів уже дозволяє нівелювати дану проблему в підстанціях із більшим бюджетом. Сучасні тренди продовжують модифікувати роботу частотного аналізу інтегруючи трактування експертних систем IEC/CIGREE додаючи методи нейронних мереж, що в свою чергу впливає на вимоги до обчислювальної техніки необхідної для даного методу в мобільних умовах. Активною альтернативою являється дослідження частотних розрядів гібридними методами, коли крім електричних параметрів досліджених у різних сигнальних спектрах фіксують явища впливу частотних розрядів, світлові вібраційні і теплові і тд. формуючи гібридну результативну систему.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Khalil, S. S., Abu-Rub, H. (2016). Smart Grid Condition Assessment: Concepts, Benefits, and Developments. *Power Electronics and Drives*, Qatar, 36(2), 147-163. doi:10.5277/PED160209
- [2] Chouhan, S., & Inan, H., & Rizzo, C. (2009). A compendium of smart grid technologies, NETL, DOE, USA, pp. 30-31.
- [3] Матусевич О.О., (2015), Удосконалення методології системи технічного обслуговування і ремонту тягових підстанцій: монографія, Дніпропетровськ : Дніпропетр. нац. ун-т заліз. трансп.ім. акад. В. Лазаряна, 2015, 295 с.
- [4] ISO18095, (2018), Condition monitoring and diagnostics of power transformers. Switzerland, p 54.
- [5] IEEE Std C57.12.10-2017,(2017),(Revision of IEEE), Standard Requirements for Liquid-Immersed Power Transformers, p 55.
- [6] IEC 60076-11:2018, (2018), Power transformers - Part 11: Dry-type transformers, p 124
- [7] Chu, D., Lux, A., (1999), On-Line Monitoring of

- Power Transformers and Components: A Review of Key Parameters, *Paper presented at the Proceedings from IEEE Electrical Insulation Conference & Electrical Manufacturers and Coil Winding Exposition*, Cincinnati, 669-675, doi:10.1109/EEIC.1999.826290
- [8] Dhingra, Khushdeep A., Deepak S., Kumar. (2008). Condition monitoring of power transformer: A review. *Paper presented at the Proceedings from 2008 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition* 1-6, doi:10.1109/TDC.2008.4517046.
- [9] Islam, M.M., Lee, G. and Hettiwatte, S.N. (2017). A review of condition monitoring techniques and diagnostic tests for lifetime estimation of power transformers. *Electrical Engineering*, 100(2). pp. 581-605, doi:10.1007/s00202-017-0532-4.
- [10] Sikorski, W., Walczak, K., Gil, W., Szymczak, C. (2020). On-Line Partial Discharge Monitoring System for Power Transformers Based on the Simultaneous Detection of High Frequency, Ultra-High Frequency, and Acoustic Emission *Signals*, *Energies*. 2020; 13(12):3271, doi:10.3390/en13123271.
- [11] Tang, W. H., Wu, Q.H. (2011), Condition monitoring and assessment of power transformers using computational intelligence, Springer-Verlag, London 2011, p.200, doi:10.1007/978-0-85729-052-6
- [12] Duan, J., & He, Y., & Wu, X., & Zhang, H., & Wu, W. (2019). Anti-Interference Deep Visual Identification Method for Fault Localization of Transformer Using a Winding Model. *Sensors*. 19. 4153. doi:10.3390/s19194153.
- [13] Meira, M., & Ruschetti, C. R. & Álvarez, R., & Verucchi, Carlos. (2018). Power transformers monitoring based on electrical measurements: State of the art., *IET Generation, Transmission & Distribution*. 12, doi:10.1049/iet-gtd.2017.2086.
- [14] Русов В.А., (2012), Диагностикаческий мониторинг высоковольтных силовых трансформаторов, Пермь: DIMRUS, 2012. – 159 с.
- [15] Duplessis, J., Ohlen, M. (2015). A smart way to minimize test time for transformer dielectric measurements, *Transformers Magazine*, 2(4), str. 44-51. Preuzeto s: <https://hrcak.srce.hr/181931>
- [16] Zhao, Z., Tang, C., Yao, C., Zhou, Q., Xu, L., Gui, Y., Islam, S. (2018) Improved method to obtain the online impulse frequency response signature of a power transformer by multi scale complex CWT, *Paper presented at the in IEEE Access*, vol. 6, pp 48934-48945, doi:10.1109/ACCESS.2018.2868058
- [17] IEC60270, (2015), High-voltage test technique, Partial discharge measurements, November 2015, p 247
- [18] N'cho J. S., Fofana I., Hadjadj Y. and Beroual, A., (2016) Review of Physicochemical-Based Diagnostic Techniques for Assessing Insulation Condition in Aged Transformers, *Reprinted from: Energies* 2016, 9, 367, doi:10.3390/en9050367
- [19] Xie B, Zhao D and Hong T (2020) Transformer Monitoring and Protection in Dynamic Power Systems – A Review. *Front. Energy Res.* 8(150). doi: 10.3389/fenrg.2020.00150
- [20] Lachman M.F., Walter W., Guggenberg P.A., (2000), On-line diagnostics of high-voltage bushings and current transformers using the sum current method, *Paper presented at the Proceedings from IEEE Transaction. on Power Delivery.*, 15(1), pp.155-162, Jan.2000, doi:10.1109/61.847244
- [21] Gil, W., Masowski, W., Wroniek, P., (2020), Overvoltages & Transients Identification In On-line Bushing Monitoring, *Journal of Energy*, 69(3), p. 20–24, doi:10.37798/202069340

Стаття надійшла до редакції 10.02.2022

## ОБЗОР ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МЕТОДОВ И СИСТЕМ МОНИТОРИНГА СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА В СРЕДЕ SMART GRID

- РЕВА І.В. аспірант, кафедри систем електропостачання та енергетичного менеджмента Кременчуцького національного університету ім. Михайла Остроградського, Кременчук, Україна, e-mail: [cgdizainer@gmail.com](mailto:cgdizainer@gmail.com);
- БЯЛОБРЖЕСКИЙ О.В. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри систем електропостачання та енергетичного менеджмента Кременчуцького національного університету ім. Михайла Остроградського, Кременчук, Україна, e-mail: [seemal@kdu.edu.ua](mailto:seemal@kdu.edu.ua);
- ТОДОРОВ О.В. аспірант, кафедри систем електропостачання та енергетичного менеджмента Кременчуцького національного університету ім. Михайла Остроградського, Кременчук, Україна, e-mail: [olehtodorov@gmail.com](mailto:olehtodorov@gmail.com);
- БЕЗЗУБ М.А. аспірант, кафедри систем електропостачання та енергетичного менеджмента Кременчуцького національного університету ім. Михайла Остроградського, Кременчук, Україна, e-mail: [bezzubmax@gmail.com](mailto:bezzubmax@gmail.com);

**Цель работы.** Применение аналитического анализа на имеющихся на практике методах мониторинга силового трансформатора для классификации и систематизации имеющейся информации для выявления рациональных, с позиции эксплуатируемого электрического измерительного оборудования трансформаторных подстанций.

**Методы исследования.** Использование методов аналитической классификации и систематизации имеющихся методов мониторинга, в поле практических исследований и полученных полевых результатов.

**Полученные результаты.** Силовые трансформаторы остаются сердцем сети и сети Smart Grid любого уровня иерархии структуры и архитектуры. Как правило трансформатор как коштостористний элемент сети вводят в эксплуатацию один раз и держат его в рабочих нагрузках, чередуя мониторинг и плановые восстановительные работы, к полной потере им рабочего состояния, необходимого с требованиями операции. Поэтому большинство трансформаторов находятся в эксплуатации более регламентирован нормированную документацией период более чем 20 лет. Проводя в необходимость гибкой аналитической оценке и классификации имеющихся уже методов мониторинга силового трансформатора, систематизации известной информации для более широкого круга специалистов энергетической отрасли.

**Научна новизна.** Установлено, что из-за сложности современных методов мониторинга необходимо время на их выбор и использование в соответствии со структурой трансформатора уменьшается с увеличением систематизации и классификации методологического материала. Представлена систематизация уменьшает расход времени и материальных ресурсов при выборе необходимого метода мониторинга силового трансформатора.

**Практическая ценность.** Систематизационная классификация имеющихся методов мониторинга в соответствующей привязке к семьям методов и зон мониторингового монтирования для поиска сигнала трансформаторных отказов.

**Ключевые слова:** силовой трансформатор; методы мониторинга; классификация методов; структуризация; диагностика; диагностика трансформатора; анализ методологии.

## REVIEW OF ELECTRIC METHODS AND SYSTEMS FOR MONITORING POWER TRANSFORMERS IN THE SMART GRID ENVIRONMENT

- REVA I.V. PhD student, Department of electricity consumption system and power management of the Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi national university, Kremenchuk, Ukraine, e-mail: cgdizainer@gmail.com;
- BIALOBRZHESKYI O.V. PhD, Department of electricity consumption system and power management of the Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi national university, Kremenchuk, Ukraine, e-mail: seemal@kdu.edu.ua;
- TODOROV O.V. PhD student, Department of electricity consumption system and power management of the Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi national university, Kremenchuk, Ukraine, e-mail: olehtodorov@gmail.com;
- BEZZUB M.A. PhD student, Department of electricity consumption system and power management of the Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi national university, Kremenchuk, Ukraine, e-mail: bezzubmax@gmail.com;

**Purpose.** Application of analytical analysis on the available methods of monitoring the power transformer in order to classify and systematize the available information to identify rational, from the standpoint of operated electrical measuring equipment for transformer substations.

**Methodology.** The use of methods of analytical classification and systematization of existing monitoring methods in the field of practical research and obtained field results.

**Findings.** Power transformers remain the heart of the power grid and Smart Grid network of any level of the hierarchy of structure and architecture. As a rule, the transformer as an estimated element of the network is put into operation once and kept in working loads, alternating monitoring and scheduled restoration work, until the complete loss of working condition required for the operation requirements. Therefore, most transformers are in operation over the regulated period of more than 20 years. Carrying out the need for flexible analytical assessment and classification of existing methods of monitoring the power transformer, systematization of known information for a wider range of specialists in the energy sector.

**Originality.** It is established that due to the complexity of modern monitoring methods the time required for their selection and use in accordance with the structure of the transformer decreases with increasing systematization and classification of the relevant methodological material. The presented systematization reduces the cost of time and mate-



rial resources when choosing the necessary method of the power transformer monitoring.

**Practical value.** Systematic classification of available monitoring methods in the appropriate relation to the families of methods and zones of monitoring mounting to search for a signal of transformer failures.

**Keywords:** power transformer; monitoring methods; classification of methods; structuring; diagnostics; transformer diagnostics; analysis of methodology.

## REFERENCES

- [1] Khalil, S. S., Abu-Rub, H. (2016). Smart Grid Condition Assessment: Concepts, Benefits, and Developments. *Power Electronics and Drives*, Qatar, 36(2), 147-163. doi:10.5277/PED160209
- [2] Chouhan, S., & Inan, H., & Rizzo, C. (2009). A compendium of smart grid technologies, NETL, DOE, USA, pp. 30-31.
- [3] Matusevich O.O., (2015), Monografy Adequate methodology of the system and technical service and repair of traction power stations: monograph, Dnipropetrovsk: Dnipropetr. nat. un-t zalizn. transp.im. acad. V. Lazaryan, 2015. -- 295 p.,
- [4] ISO18095, (2018), Condition monitoring and diagnostics of power transformers. Switzerland, p 54.
- [5] IEEE Std C57.12.10-2017,(2017),(Revision of IEEE), Standard Requirements for Liquid-Immersed Power Transformers, p 55.
- [6] IEC 60076-11:2018, (2018), Power transformers - Part 11: Dry-type transformers, p 124
- [7] Chu, D., Lux, A., (1999), On-Line Monitoring of Power Transformers and Components: A Review of Key Parameters, *Paper presented at the Proceedings from IEEE Electrical Insulation Conference & Electrical Manufacturers and Coil Winding Exposition*, Cincinnati, 669-675, doi:10.1109/EEIC.1999.826290.
- [8] Dhingra, Khushdeep A., Deepak S., Kumar. (2008). Condition monitoring of power transformer: A review. *Paper presented at the Proceedings from 2008 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition* 1-6, doi:10.1109/TDC.2008.4517046.
- [9] Islam, M.M., Lee, G. and Hettiwatte, S.N. (2017). A review of condition monitoring techniques and diagnostic tests for lifetime estimation of power transformers. *Electrical Engineering*, 100(2). pp. 581-605, doi:10.1007/s00202-017-0532-4.
- [10] Sikorski, W., Walczak, K., Gil, W., Szymczak, C. (2020). On-Line Partial Discharge Monitoring System for Power Transformers Based on the Simultaneous Detection of High Frequency, Ultra-High Frequency, and Acoustic Emission Signals, *Energies*. 2020; 13(12):3271,doi:10.3390/en13123271.
- [11] Tang, W. H., Wu, Q.H. (2011), Condition monitoring and assessment of power transformers using computational intelligence, Springer-Verlag, London 2011, p.200, doi:10.1007/978-0-85729-052-6
- [12] Duan, J., & He, Y., & Wu, X., & Zhang, H., & Wu, W. (2019). Anti-Interference Deep Visual Identification Method for Fault Localization of Transformer Using a Winding Model. *Sensors*. 19. 4153. doi:10.3390/s19194153.
- [13] Meira, M., & Ruschetti, C. R. & Álvarez, R., & Verucchi, Carlos. (2018). Power transformers monitoring based on electrical measurements: State of the art., *IET Generation, Transmission & Distribution*. 12,doi;10.1049/iet-gtd.2017.2086.
- [14] Rusov, V.A., (2012), Diagnostic monitoring of high-voltage power transformers, Perm: DIMRUS, 2012. - 159 p..
- [15] Duplessis, J., i Ohlen, M. (2015). A smart way to minimize test time for transformer dielectric measurements, *Transformers Magazine*, 2(4), str. 44-51. Preuzeto s: <https://hrcak.srce.hr/181931>
- [16] Zhao, Z., Tang, C., Yao, C., Zhou, Q., Xu, L., Gui, Y., Islam, S. (2018) Improved method to obtain the online impulse frequency response signature of a power transformer by multi scale complex CWT, *Paper presented at the in IEEE Access*, vol. 6, pp 48934-48945, doi:10.1109/ACCESS.2018.2868058
- [17] IEC60270, (2015), High-voltage test technique, Partial discharge measurements, November 2015, p 247
- [18] N'cho J. S., Fofana I., Hadjadj Y. and Beroual, A., (2016) Review of Physicochemical-Based Diagnostic Techniques for Assessing Insulation Condition in Aged Transformers, *Reprinted from: Energies* 2016, 9, 367, doi:10.3390/en9050367
- [19] Xie B, Zhao D and Hong T (2020) Transformer Monitoring and Protection in Dynamic Power Systems – A Review. *Front. Energy Res.* 8(150). doi: 10.3389/fenrg.2020.00150
- [20] Lachman M.F., Walter W., Guggenberg P.A., (2000), On-line diagnostics of high-voltage bushings and current transformers using the sum current method, *Paper presented at the Proceedings from IEEE Transaction. on Power Delivery.*, 15(1), pp.155-162, Jan.2000, doi:10.1109/61.847244
- [21] Gil, W., Masowski, W., Wronek, P., (2020), Overvoltages & Transients Identification In On-line Bushing Monitoring, *Journal of Energy*, 69(3), p. 20–24, doi:10.37798/202069340

УДК 621.316

## ШЛЯХИ АНАЛІЗУ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ МАГІСТАЛЬНОГО КОНВЕЄРНОГО ТРАНСПОРТУ

ПРОКУДА В.М. канд. техн. наук, асистент кафедри електроенергетики Національного ТУ «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна, e-mail: prokuda.v.m@nmu.one;

БУРТНИЙ Д.І. студент, гр. 141-18-1, кафедри електроенергетики Національного ТУ «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна, e-mail: burtnyi.d.i@nmu.one.

**Мета роботи.** Ґрунтуючись на проведених дослідженнях, за узагальненими даними потенціал зниження витрат електроенергії на конвеєрному транспорті знаходиться в межах 40 - 50%. Одним з перспективних методів вирішення проблеми є впровадження перетворювачів частоти і систем регулювання швидкості руху стрічки, які згідно з розрахунками дозволять знизити витрату електроенергії на 28-35%. Виходячи з викладеного, основною метою є розробка більш досконалих та інноваційних методів спрямованих на аналіз можливостей підвищення енергоефективності шахтного конвеєрного транспорту. Робота ставить перед собою мету дослідження потенціалу зниження енерговитрат для шахтного комплексу шахтоуправління «Покровське» шляхом розробки імітаційної моделі енергоспоживання шахтного конвеєрного транспорту з урахуванням динаміки вантажопотоків. Також перед роботою поставлена мета розробки імітаційної моделі, яка повинна дозволити задавати в широкому діапазоні величину вантажопотоку, що надходить, задавати механічні параметри конвеєрів, таких як: кут установки, масу рухомої частини, швидкість стрічки та продуктивність комплексу у цілому.

**Методи дослідження.** Марківські процеси, елементи теорії вірогідності та математичної статистики, котрі були використані для розробки імітаційної моделі вантажопотоків шахтного конвеєрного транспорту у середовищі моделювання «Matlab».

**Отримані результати.** Показано розрахунок електроспоживання магістрального конвеєрного транспорту шахти шахтоуправління «Покровське» за допомогою розробленої імітаційної моделі. Отримані розрахункові дані для обладнання, яке бере участь у технологічному процесі підприємства, що дає можливість підвищити його продуктивність та оптимізувати виробничі витрати у майбутньому. Розроблена імітаційна модель, яка дозволяє задавати в широкому діапазоні величину вантажопотоку що надходить (час надходження / відсутності, математичне сподівання і дисперсію); задавати механічні параметри конвеєрів (кут установки, масу рухомих частин, максимальну продуктивність, номінальну швидкість руху стрічки); моделювати зниження швидкості при установці регульованого приводу; задавати шкідливість і продуктивність бункерів в вузлах схеми; автоматизувати розрахунок електроспоживання окремо кожного конвеєра і схеми транспорту в цілому за будь-якої конфігурації перерахованих вище параметрів.

**Наукова новизна.** Розроблена імітаційна модель дозволяє автоматизувати розрахунок електроспоживання окремо кожного конвеєра і схеми шахтного конвеєрного транспорту в цілому за будь-якої конфігурації основних технічних параметрів розглянутого обладнання.

**Практична цінність.** Практичним значенням результатів роботи є розроблена модель ділянки системи конвеєрного транспорту шахти шахтоуправління «Покровське», яка на основі проведених досліджень дозволяє зробити висновок, що застосування частотно регульованого приводу дозволить знизити електроспоживання конвеєрного ланцюжка на 25-50%. Також за отриманими даними, з частковим розрахунком додаткових параметрів можна зробити висновок про перспективи та можливості впровадження запропонованих методів на виробничому процесі.

**Ключові слова:** конвеєр; шахтна мережа; вантажопотік; електроспоживання; частотний перетворювач.

### I. ВСТУП

На сучасних вугільних шахтах конвеєрний транспорт є основним видом транспортування корисних копалин безпосередньо з місця видобутку на поверхню [1], [2]. З причини особливостей технологічного процесу завантаження конвеєра є не рівномірним і як наслідок за період робочої зміни конвеєр працює із завантаженням менше номінального або в режимі холостого ходу [3]-[6]. Такі режими роботи призводять до значних невиробничих витрат електроенергії, що перевищують нормативи в три рази [8].

Ґрунтуючись на проведених дослідженнях, за узагальненими даними потенціал зниження витрат електроенергії на конвеєрному транспорті знаходиться в межах 40 - 50% [9]-[11]. Одним з перспективних методів вирішення проблеми є впровадження перетворювачів частоти і систем регулювання швидкості руху стрічки, які згідно з розрахунками дозволять

додатково знизити витрати електроенергії, що перевищують нормативи в три рази [8].

знизити витрату електроенергії на 28-35% [12]-[13].

## II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Об'єктом досліджень виступають технологічні процеси роботи магістрального конвеєрного транспорту шахтної мережі шахтоуправління «Покровське». Дослідження закономірності зміни витрат електроенергії при нерівномірному завантаженні конвеєрної стрічки і розробка шляхів підвищення енергоефективності шахтного конвеєрного комплексу проводилися відповідно до схеми конвеєрного транспортного шахти шахтоуправління «Покровське» (рис. 1), а також отриманої документації паспортних даних використовуваного обладнання.

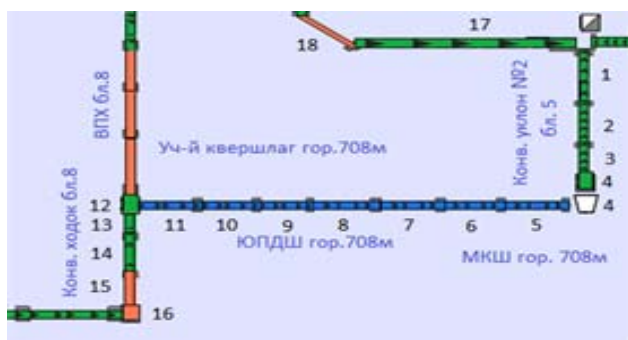


Рисунок 1. Схема підземного конвеєрного транспорту шахти шахтоуправління "Покровське"

## III. МЕТА РОБОТИ

Метою роботи є аналіз шляхів підвищення енергоефективності шахтного конвеєрного транспорту шахти шахтоуправління «Покровське» за допомогою розробленої імітаційної моделі енергоспоживання шахтного конвеєрного транспорту.

## IV. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ МАГІСТРАЛЬНОГО КОНВЕЄРНОГО ТРАНСПОРТУ

Дослідження були проведені на ділянці, що складається з 16 конвеєрів, що належить до конвеєрного ходку блоку №8, ЮПДШ горизонту 708, МКШ горизонту 708 і конвеєрного ухилу №2.

Змінні умови режимів роботи конвеєрного транспорту дозволили встановити, що регулювання швидкості руху стрічки окремого конвеєра змінює статистичні характеристики вантажопотоку після нього, що призводить до зміни швидкості транспортування наступних конвеєрів і впливає на їх електроспоживання.

З метою встановлення закономірності впливу надходження вантажопотоку з видобувного забою на електроспоживання очисного комплексу в цілому була розроблена імітаційна модель зміни вугільного потоку з урахуванням регулювання швидкості руху стрічки конвеєра в середовищі моделювання «Matlab» (рис. 2). [7]. Необхідність розробки імітаційної моделі

були викликана складними залежностями розрахунку електроспоживання конвеєрної лінії при проходженні стохастичних вантажопотоків [14].

Зміна статистичних характеристик вантажопотоків за допомогою регульованого приводу впливає на електроспоживання шахтних конвеєрів [15]-[16].

Прийmemo допущення, що залежність необхідно для пересування частин зусилля від маси вантажу на конвеєрі, має лінійний характер.

Швидкість є функцією від вантажопотоку:

$$v_k(Q_i) = \begin{cases} K_n Q_i(t_i) \text{ при } Q_i(t_i) > 0, \\ K_{ск} \cdot v_{ном} \text{ при } Q_i(t_i) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

де  $K_n$  - коефіцієнт пропорційності, м / кг.

Маса вантажу на конвеєрі при регульованій швидкості руху стрічки визначається чисельними методами, оскільки залежить від змінної транспортної затримки:

$$QS = f(Q(t), v_k(Q(t))); \quad (2)$$

Електроспоживання конвеєра за добу або зміну:

$$W = F(QS[Q(t_i), Q(t_{i-1}), Q(t_{i-\tau}), v_k(Q(t_i))] \cdot v_k(Q(t_i)) \cdot t; \quad (3)$$

де  $Q(t_{i-\tau})$  - значення процесу  $Q(t)$ , які відстають від  $Q(t)$  і на змінну транспортну затримку  $\tau$ .

Використовуючи вирази щільності ймовірності розподілу вантажопотоку і швидкості руху стрічки конвеєра для розрахунку витрати електроенергії у літературі [17] використовується співвідношення:

$$W = F(p(QS) \cdot QS_{макс} \cdot l) \cdot p(v_k) \cdot v_{ном} \cdot t; \quad (4)$$

де  $p(QS)$  - щільність ймовірності розподілу погонного навантаження,  $QS_{макс}$  - максимально можлива маса вантажу на конвеєрі, кг.

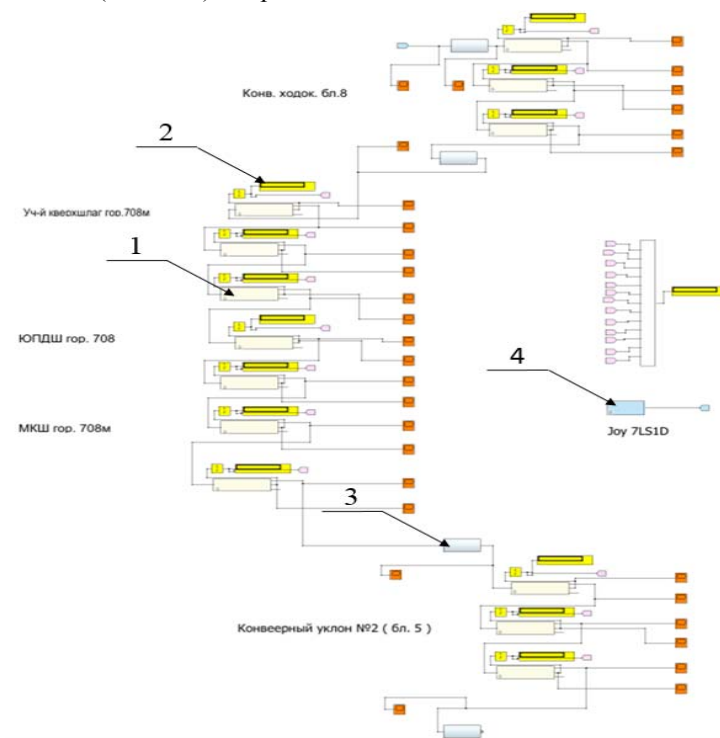
Наприклад, щільність ймовірності розподілу погонного навантаження на конвеєрі при надходженні вантажопотоку з одного очисного забою [18]:

$$p(QS) = \frac{\lambda \cdot K_{ск}}{\lambda \cdot K_{ск} + \mu} \cdot \delta(0) + \frac{\mu}{\mu + \lambda \cdot K_{ск}} \cdot (QS_{макс}); \quad (5)$$

Вантажопотік моделювався як стохастична величина, яка задається трьома параметрами: очікува-

ним інтервалом надходження  $K_m$  (в відносних одиницях від «робочої зміни»), величиною математичного очікування при надходженні  $M$  (в кг / хв) і середньо-

квадратичним відхиленням від математичного очікування  $D$  (в кг / хв ).

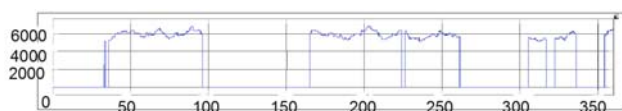


1 - прямокутники, що імітують конвеєра; 2 - осцилографи підрахунку електроспоживання конвеєрів; 3 - проміжні бункера; 4 - очисний забій з комбайном JOY

**Рисунок 2.** Імітаційна модель шахтного комплексу шахти шахтоуправління «Покровське»

За допомогою розробленої імітаційної моделі був виконаний аналіз електроспоживання для трьох рівнів математичного очікування надходження вантажопотоку - 6, 9 і 12 т / хв, а також для трьох схем установки регульованого приводу: без установки перетворювачів частоти, з установкою на конвеєрах 1,2,3, і 13,14,15, а також з їх повним впровадженням. Результатами проведення дослідження стали отримані на імітаційній моделі осцилограми вантажопотоків і електроспоживання в вузлах конвеєрної мережі зображені на рисунках.

Осцилограми вантажопотоків:



**Рисунок 3.** Осцилограма вантажопотоку конвеєра № 13 (без установки частотного перетворювача)



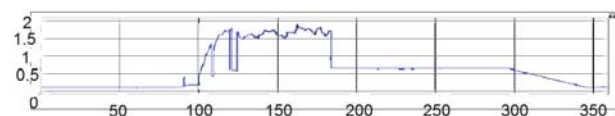
**Рисунок 4.** Осцилограма вантажопотоку конвеєра

№ 13 (з установкою частотного перетворювача)

Осцилограми електроспоживання:



**Рисунок 5.** Осцилограма електроспоживання конвеєра № 13 (без установки частотного перетворювача)



**Рисунок 6.** Осцилограма електроспоживання конвеєра № 13 (без установки частотного перетворювача)

При аналізі осцилограм найцікавішим є споживання конвеєра при регулюванні швидкості руху стрічки. Коли потік не надходить автоматика виставляє швидкість рівну приблизно 1/10 від номінальної - в нашому випадку це 0,25 м/с. При це, на

відміну від випадку без регульованого приводу, електроспоживання складає близько 0,2 кВт \* год в хвилину проти 1,6 кВт \* год в хвилину.

У періоди надходження вантажопотоку (наприклад для конвеєра № 13 це 120 - 150 хв) споживання нижче, ніж для випадку з нерегульованим приводом (приблизно 1,6 кВт \* год в хвилину проти 2,7 кВт \* год в хвилину). Що цікаво, в зв'язку з перерозподілом вантажопотоку споживання конвеєрів далі по ланцюгу становить ще менші значення - для конвеєра №5 це 0,5 кВт \* год в хвилину проти 2,2 кВт \* год в хвилину для випадку без регульованого приводу.

Практичним значенням результатів роботи є отримані значення електроспоживання системи конвеєрного транспорту шахти шахтоуправління «Покровське», зведені в табл. 1.

**Таблиця 1.** Електроспоживання системи конвеєрного транспорту шахти шахтоуправління «Покровське».

	Математичне очікування вантажопотоку 6 т/хв	Математичне очікування вантажопотоку 9 т/хв	Математичне очікування вантажопотоку 12 т/хв
Нерегульований привод	8665,44 (100%)	8829,26 (100%)	12151,1 (100%)
Регульований привод на 1,2,3,11,12,13 конвеєрах	5577,52 (64,36%)	6809,81(77,12%)	8574,47 (70,56%)
Регульований привод на всіх конвеєрах	1711,69 (19,75%)	1795,65 (20,34%)	6214,15 (51,14%)

На підставі моделі електроспоживання конвеєрного ланцюга на 25-50%.

## V. ВИСНОВКИ

Розроблена імітаційна модель аналізу і розрахунку енергоефективності при впровадженні регульованого приводу на шахті шахтоуправління «Покровське», що враховує технічні характеристики встановленого обладнання і передбачувані значення вантажопотоків.

Зокрема розроблена імітаційна модель дозво-

ляє:

- задавати в широкому діапазоні величину вантажопотоку що надходить (час надходження / відсутності, математичне сподівання і дисперсію);
- задавати механічні параметри конвеєрів (кут установки, масу рухомих частин, максимальну продуктивність, номінальну швидкість руху стрічки);
- моделювати зниження швидкості при установці регульованого приводу;
- задавати ємність і продуктивність бункерів в вузлах схеми;
- автоматизувати розрахунок електроспоживання окремо кожного конвеєра і схеми транспорту в цілому за будь-якої конфігурації перерахованих вище параметрів.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Бурчаков, А.С. Выбор рациональных технологических схем угольных шахт / Бурчаков А.С., Харченко В.А., Кафорин Л.Н. – М.: Недра, 1975. – 271 с
- [2] Котов, М.А. Опыт эксплуатации ленточных конвейеров и конвейерных лент на угольных шахтах / М.А. Котов, Ю.И. Григорьев, Г.А. Загорский и др. М., изд. ЦНИЭИ Уголь, 1970, – 91 с
- [3] Заика, В.Т. Регулировочная способность электроприемников в составе технологических звеньев угольной шахты и способы ее реализации для управления электросбережением / Заика В.Т. // Гірнична електромеханіка та автоматика: Межвед. науч.-техн. сб. – 1998. – Вып. 1(60). – С. 35 – 40.
- [4] Пивняк, Г.Г. Новые способы и проекты повышения эффективности электроэнергетического комплекса угольной шахты / Пивняк Г.Г., Разумный Ю.Т., Заика В.Т. // Науковий вісник НГА України. - Дніпропетровськ: [НГА України] – 1999. – № 6. – С. 95–104/
- [5] Кузнецов Б.А. Динамика пуска длинных ленточных конвейеров. / Кузнецов Б.А. //Транспорт шахт и карьеров. М.: Недра, 1971
- [6] Энергоэффективность магистрального конвейерного транспорта угольных шахт с учетом динамики грузопотоков; диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Прокуда В.Н.
- [7] Mathworks. Accelerating the pace of engineering and science [Електронний ресурс] – Режим доступу до даних: <http://www.mathworks.com/help/simulink/>
- [8] Fu Zhang, Murali Yeddanapudi, Variable transport delay modeling mechanism, US8180608 В1 [Електронний ресурс] – Режим доступу до даних:

- <http://www.google.com.na/patents/US8180608>.
- [9] G. Lodewijks, D. L. Schott and Y. Pang Energy saving at belt conveyors by speed control, (2011) In s.n. (Ed.), Proceedings of the 16th beltcon conference (pp. 1-10). Fourways: Imhc. url: <http://www.beltcon.org.za/docs/B16-12.pdf>
- [10] Lauhoff H. Speed Control on Belt Conveyors – Does it Really Save Energy? (2005) Bulk Solids Handling Publ.; 25(6), pp. 368-377
- [11] Shirong Zhang, Xiaohua Xia, Optimal control of operation efficiency of belt conveyor systems (2010), Applied Energy Publ., vol. 87, pp. 1929–1937. url: <http://www2.ee.up.ac.za/~xxia/APEN2010.pdf>
- [12] Система учета и контроля расхода электроэнергии для угольных шахт / Г.Г. Пивняк, В.В. Ткачев, В.Т. Заика, А.А. Шишацкий, В.В. Надточий, Ю.Т. Разумный. // Промышленная энергетика, 1992, № 7, с.19–21.
- [13] Малиновский, А.К. Автоматизированный электропривод машин и установок шахт и рудников: Учебник для вузов / Малиновский А.К. – М.: Недра, 1987. – 277 с
- [14] Гаврилов, П.Д. Структура системы управления многоприводным ленточным конвейером / Гаврилов П.Д., Носков А.П.// Электротехника, №5, –2009 с. 17–21.
- [15] Енергобаланс вугільних підприємств. Аудит енергоспоживання. Інструкція. Стандарт Мінпаливенерго України : СОУ 10.1.00174094.001- 2004. – Чинний від 2005-01-01. Наказ Мінпаливенерго України від 17.11.2004 № 726. – Київ, 2004.
- [16] Нормирование топливно-энергетических ресурсов и регулирование режимов энергопотребления / Под ред. В.В. Дегтярева. –М.: Недра, 1983. – 244 с
- [17] Конвейеры ленточные шахтные. Методика расчета: ОСТ 12.14.130- 79. / Минуглепром СССР; введ 1981.01.01. – М., 1980. – 70 с.
- [18] Кирия, Р. В. Об определении коэффициента сопротивления движению ленты конвейера по роликоопорам / Р. В. Кирия, Т. Ф. Мищенко, Р. Г. Павленко // Геотехническая механика: Межвед. сб. научн. тр. / [ИГТМ НАН Украины]. – Днепропетровск. – 2003. – Вып. № 47. – С. 98 – 107

Стаття надійшла до редакції 15.01.2022

## ПУТИ АНАЛИЗА ЕЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ МАГИСТРАЛЬНОГО КОНВЕЙЕРНОГО ТРАНСПОРТА

ПРОКУДА В.Н. канд. техн. наук, ассистент кафедры электроэнергетики Национального ТУ «Днепропетровская политехника», Днепр, Украина, e-mail: prokuda.v.m@nmu.one;

БУРТНЫЙ Д.И. студент, гр. 141-18-1, кафедры электроэнергетики Национального ТУ «Днепропетровская политехника», Днепр, Украина, e-mail: burtnyi.d.i@nmu.one.

**Цель работы.** Основываясь на проведенных исследованиях, по обобщенным данным потенциал снижения расхода электроэнергии на конвейерном транспорте находится в пределах 40 - 50%. Одним из перспективных методов решения проблемы является внедрение преобразователей частоты и систем регулирования скорости движения ленты, которые согласно расчетам позволят снизить расход электроэнергии на 28-35%. Исходя из изложенного, основной целью является разработка более совершенных и инновационных методов, направленных на анализ возможностей повышения энергоэффективности шахтного конвейерного транспорта. Работа ставит перед собой цель исследования потенциала снижения энергозатрат для шахтного комплекса «Покровское» путем разработки имитационной модели энергопотребления шахтного конвейерного транспорта с учетом динамики грузопотоков. Также перед работой поставлена цель разработки имитационной модели, которая должна позволить задавать в широком диапазоне величину поступающего грузопотока, задавать механические параметры конвейеров, таких как: угол установки, массу подвижной части, скорость ленты и производительность комплекса в целом.

**Методы исследования.** Марковские процессы, элементы теории вероятности и математической статистики, использованные для разработки имитационной модели грузопотоков шахтного конвейерного транспорта в среде моделирования Matlab.

**Полученные результаты.** Показан расчет электропотребления магистрального конвейерного транспорта шахты шахтоуправления «Покровское» с помощью разработанной имитационной модели. Получены расчетные данные для оборудования, участвующего в технологическом процессе предприятия, что позволяет повысить его производительность и оптимизировать производственные паруса в будущем. Разработана имитационная модель, которая позволяет: задавать в широком диапазоне величину поступающего грузопотока (время поступления/отсутствия, математическое ожидание и дисперсию); задавать механические параметры конвейеров (угол установки, массу подвижных частей, максимальную производительность, номина-

льную скорость движения ленты); моделировать снижение скорости при установке регулируемого привода; задавать емкость и производительность бункеров в узлах схемы; автоматизировать расчет электропотребления отдельно каждого конвейера и схемы транспорта в целом при любой конфигурации вышеперечисленных параметров.

**Научна новизна.** Разработанная имитационная модель позволяет автоматизировать расчет электропотребления отдельно каждого конвейера и схемы шахтного конвейерного транспорта в целом при любой конфигурации основных технических параметров рассматриваемого оборудования.

**Практическая ценность.** Практическим значением результатов работы является разработанная модель участка системы конвейерного транспорта шахты шахтоуправления «Покровское», которая на основе проведенных исследований позволяет заключить, что применение частотно регулируемого привода позволит снизить электропотребление конвейерной цепочки на 25-50%. Также по полученным данным, с частичным расчетом дополнительных параметров можно заключить о перспективах и возможностях внедрения предложенных методов на производственном процессе.

**Ключевые слова:** конвейер; шахтная сеть; грузопоток; электропотребление; частотный преобразователь.

## WAYS OF ANALYSIS OF ELECTRIC CONSUMPTION OF MAIN CONVEYOR TRANSPORT

PROKUDA V.N. Ph.D. in Technology, assistant of the Department of Power Engineering of the National Technical University "Dneprovskaya Polytechnic", Dnipro, Ukraine, e-mail: prokuda.v.m@nmu.one;

BURTNYI D.I. student, gr. 141-18-1, Department of Power Engineering of the National Technical University "Dneprovskaya Polytechnic", Dnipro, Ukraine, e-mail: burtnyi.d.i@nmu.one.

**Purpose.** Based on the conducted research, according to generalized data, the potential for reducing electricity costs on conveyor transport is in the range of 40 - 50%. One of the promising methods of solving the problem is the introduction of frequency converters and tape speed control systems, which according to calculations will reduce energy consumption by 28-35%. Based on the above, the main goal is to develop more advanced and innovative methods aimed at analyzing the possibilities of improving the energy efficiency of mine conveyor transport. The work aims to study the potential for reducing energy consumption for the mine complex of mine management "Pokrovske" by developing a simulation model of energy consumption of mine conveyor transport, taking into account the dynamics of freight flows. Also before the work is the goal of developing a simulation model, which should allow to set a wide range of incoming cargo, set the mechanical parameters of conveyors, such as: installation angle, weight of the moving part, belt speed and productivity of the complex as a whole.

**Methodology.** Markov processes, elements of probability theory and mathematical statistics, which were used to develop a simulation model of freight flows of mine conveyor transport in the modeling environment "Matlab".

**Findings.** The calculation of electricity consumption of the main conveyor transport of the mine of the Pokrovske mine management is shown, with the help of the developed simulation model. Estimated data for equipment involved in the technological process of the enterprise, which allows to increase its productivity and optimize production winds in the future. A simulation model is developed. It allows set in a wide range the amount of incoming cargo flow (time of arrival / absence, mathematical expectation and variance); set the mechanical parameters of the conveyors (installation angle, mass of moving parts, maximum productivity, nominal speed of the belt); to simulate the reduction of speed when installing a regulated drive; set the capacity and performance of the bunkers in the nodes of the circuit; automate the calculation of electricity consumption separately for each conveyor and the transport scheme as a whole for any configuration of the above parameters.

**Originality.** The developed simulation model allows to automate the calculation of the power consumption of each conveyor separately and the mine conveyor transport scheme as a whole for any configuration of the main technical parameters of the considered equipment.

**Practical value.** The practical significance of the work is the developed model of the conveyor transport system of the mine management mine "Pokrovske", which based on research allows us to conclude that the use of frequency-controlled drive will reduce power consumption of the conveyor chain by 25-50%. Also, according to the obtained data, with a partial calculation of additional parameters, it is possible to draw a conclusion about the prospects and possibilities of implementing the proposed methods in the production process.

**Keywords.** conveyor; mine network; freight traffic; power consumption; frequency converter.



## REFERENCES

- [1] Burchakov, A.S., Xarchenko, V.A., Kaforin, L.N. (1975). Vybora racional'nykh tekhnologicheskikh sxem ugol'nykh shaxt. Moscow, Nedra, 271.
- [2] Kotov, M.A., Grigor'ev, Yu.I., Zagorskij, G.A. (1970). Opyt ekspluatacii lentochnykh konvejerov i konvejernyx lent na ugol'nykh shaxtax. Moscow, izd. CNIE'I Ugo'l', 91
- [3] Zaika, V.T. (1998). Regulirovochnaya sposobnost' e'lektro-priemnikov v sostave tekhnologicheskikh zven'ev ugol'noj shaxty i sposoby ee realizacii dlya upravleniya e'lektroberezheniem. *Girnichaya elektromexanika ta avtomatika: Mezhd. nauch.-tehn.* Vol. 1(60), 35-40.
- [4] Pivnyak, G.G., Razumnyj, Yu.T., Zaika, V.T. (1999). Novye sposoby i proekty povyshe-niya e'fektivnosti e'lektroenergeticheskogo kompleksa ugol'noj shaxty. *Naukovij visnik NGA Ukraïni.* Dnipropetrovs'k: [NGA Ukraïni]. No 6, 95–104
- [5] Kuznecov, B.A. (1971). Dinamika puska dlennykh lentochnykh konvejerov. Transport shaxt i kar'erov. Moscow Nedra.
- [6] E'nergoe'ffektivnost' magistral'nogo konvejer-nogo transporta ugol'nykh shaxt s uchetom dinamiki gruzopotokov; dissertaciya na soiskanie uche-noj stepeni kandidata tekhnicheskix nauk. Prokud V.N.
- [7] Mathworks. Accelerating the pace of engineering and science [Elektronnij resurs] – Rezhim dostupu do danix: <http://www.mathworks.com/help/simulink/>
- [8] Fu Zhang, Murali Yeddanapudi, Variable transport delay modeling mechanism, US8180608 B1 [Elektronnij resurs] – Rezhim dostupu do danix: <http://www.google.com/patents/US8180608>.
- [9] G. Lodewijks, D. L. Schott and Y. Pang Energy saving at belt conveyors by speed control, (2011) In s.n. (Ed.), Proceedings of the 16th beltcon conference (pp. 1-10). Fourways: Imhc. url: <http://www.beltcon.org.za/docs/B16-12.pdf>
- [10] Lauhoff H. (2005) Speed Control on Belt Conveyors – Does it Really Save Energy? Bulk Solids Handling Publ.; 25(6), 368-377
- [11] Shirong Zhang, Xiaohua Xia, Optimal control of operation efficiency of belt conveyor systems (2010), Applied Energy Publ., vol. 87, pp. 1929–1937. url: <http://www2.ee.up.ac.za/~xxia/APEN2010.pdf>
- [12] Pivnyak, G.G., Tkachev, V.V., Zaika, V.T., Shishackij, A.A., Nadtochij, V.V., Razumnyj, Yu.T. (1992). Sistema ucheta i kontrolya rasxoda e'lektroenergii dlya ugol'nykh shaxt. *Promyshlennaya e'nergetika*, No 7, 19–21.
- [13] Malinovskij, A.K. (1987). Avtomatizirovannyj e'lektroprivod mashin i ustanovok shaxt i rudnikov: Uchebnik dlya vuzov. Moscow Nedra, 277.
- [14] Gavrilov, P.D., Noskov, A.P. (2009). Struktura sistemy upravleniya mnogoprivodnym lentochnym konvejerom. *E'lektrotexnika*, No 5, 17–21.
- [15] Enerlobalans vugil'nix pidpriemstv. (2004). Audit ener-gospozhivannya. Instrukciya. Standart Minpalivenergo Ukraïni : SOU 10.1.00174094.001- 2004. – Chinnij vid 2005-01-01. Nakaz Minpalivenergo Ukraïni vid 17.11.2004 No 726, Kiyv.
- [16] Degtyareva, V.V. (1983). Normirovanie toplivno-energeticheskix resursov i regulirovanie rezhimov e'nergopotrebleniya. Moscow Nedra, 244.
- [17] Konvejery lentochnye shaxtnye. (1980). Metodika rasche-ta: OST 12.14.130- 79. / Minugleprom SSSR; vved 1981.01.01. – Moscow, 70.
- [18] Kiriya, R. V., Mishhenko, T. F., Pavlenko, R. G. (2003). Ob opredelenii koefficienta so-protivleniya dvizheniyu lenty konvejera po rolkooporam. *Geotexnicheskaya mexanika: Mezhd. sb. nauchn. tr. / [IGTM NAN Ukrainy].* – Dnepropetrovsk. No 47, 98-107.

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВИТРАТИ ЕНЕРГІЇ НА ПРОЦЕС ПОЧАТКОВОГО НАГРІВУ СУБСТРАТУ ЗА ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕКТРОТЕПЛОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ

**ЗАБЛОДСЬКИЙ М.М.** д-р техн. наук, професор кафедри електротехніки, електромеханіки і електротехнологій, ННІ енергетики, автоматики і енергозбереження, Національного університету біоресурсів і природокористування України, Київ, Україна, e-mail: zablodskiyinn@gmail.com;

**СПОДОБА М.О.** аспірант кафедри електротехніки, електромеханіки і електротехнологій, ННІ енергетики, автоматики і енергозбереження, Національного університету біоресурсів і природокористування України, Київ, Україна, e-mail: spmisha@ukr.net;

**СПОДОБА О.О.** канд. техн. наук (PhD), асистент кафедри конструювання машин і обладнання, Національного університету біоресурсів і природокористування України, Київ, Україна, e-mail: sp1309@ukr.net;

**Мета роботи.** Експериментальне визначення витрат енергії на процес початкового нагріву субстрату до температури анаеробного зброджування у біогазовому реакторі за використання електротепломеханічної системи з автоматичним керуванням для оцінки енергетичної ефективності процесу підігріву субстрату та рентабельності подальшої переробки утвореного біогазу у теплову та електричну енергії.

**Методи дослідження.** Експериментальні дослідження динаміки зміни температури електричного нагрівального кабелю, розміщеного у електротепломеханічній системі, визначення тривалості процесу і витраченої енергії початкового підігріву субстрату, обробка та порівняльний аналіз отриманих масивів даних, узагальнення отриманих результатів.

**Отримані результати.** У формуванні сучасної енергетичної системи важливу роль відіграють біогазові технології, рентабельність яких безпосередньо залежить від енергоефективності процесів інтенсифікації анаеробного зброджування. Процес анаеробного зброджування відходів є довготривалим, тому одним з основних методів інтенсифікації біогазового виробництва є перемішування відходів у процесі анаеробного бродіння. Існує необхідність підвищення енергоефективності процесів інтенсифікації анаеробного зброджування та рентабельності подальшої переробки біогазу у теплову та електричну енергії. Способи підвищення енергоефективності здебільшого полягають у скороченні часу підігріву субстрату у біогазовому реакторі, зменшенні витрати електричної енергії на процес термостабілізації анаеробного зброджування, структурному поєднанні енергетично ефективних систем перемішування та підігріву сировини у реакторах, впровадженні систем автоматичного керування процесами інтенсифікації біогазового виробництва. Реалізація цих дій дозволить встановити оптимальні геометричні розміри електротепломеханічної системи з автоматичним керуванням для перемішування та підігріву субстрату у біогазовому реакторі та суттєво підвищити енергетичну ефективність біогазових установок і подальшу переробку утвореного біогазу у теплову та електричну енергії.

**Наукова новизна.** У результаті проведеного експериментального дослідження та аналізу отриманих даних встановлено, що за однакової потужності нагрівальних секцій зміна температури електричного нагрівального кабелю у кожній лопаті відбувається не однаково. Авторами встановлено, що середні значення температури секцій електричного нагрівального кабелю нижніх лопатей більше на 12.9% у порівнянні з верхніми лопатями електротепломеханічної системи. Авторами у ході експериментальних досліджень встановлено, що за використання системи підігріву, виконаної із електричного нагрівального кабелю, що вмонтований у лопаті двоярусної лопатевої мішалки, витрачається  $W_2 = 4.99 \cdot 10^6$  Дж на процес початкового підігріву субстрату з  $9.3^\circ\text{C}$  до  $35.8^\circ\text{C}$  у біогазовому реакторі об'ємом 40 літрів. Тривалість самого підігріву складає 300 хв. У ході експериментальних досліджень авторами було встановлено енергетичну ефективність від розділення електротепломеханічної системи на секції підігріву, коли кожна лопать є окремою секцією з власним автоматичним регулюванням температури електричного нагрівального кабелю вмонтованого у відповідну секцію, при цьому споживання електричної енергії зменшується на 27.9%.

**Практична цінність.** Отримані результати можуть бути використані при проектуванні, будівництві та модернізації систем інтенсифікації біогазового виробництва, а саме, перемішування та підігріву субстрату у біогазових установках. Це дозволить підвищити енергетичну ефективність процесу утворення біогазу та рентабельність його переробки у теплову та електричну енергії.

**Ключові слова:** експеримент; енергоефективність; початковий нагрів субстрату; електротепломеханічна система; перемішування; енергоспоживання; температура зброджування.

## I. ВСТУП

У формуванні сучасної енергетичної системи країн світу важливу роль відіграють біогазові технології, тому увага до їх енергетичної ефективності підвищена.

Збільшення фермерських та сільськогосподарських угідь, разом зі зростанням поголів'я тварин призводить до накопичення рослинних та тваринних відходів – біомаси. Це підштовхує населення на пошуки альтернативних методів утилізації та переробки отриманих відходів, оскільки системи збереження є джерелами небезпечних викидів метану та окисів азоту [1]-[4]. Така ситуація призводить до забруднення повітря, водних ресурсів, посилення кліматичних змін та парникового ефекту, що робить дослідження та розвиток відновлювальних джерел енергії актуальною справою [5].

Для утилізації побутових та промислових органічних відходів, каналізаційних стічних вод найбільшого розповсюдження отримала аеробна та анаеробна обробка у спеціальних резервуарах – біогазових реакторах [6].

На сьогоднішній день зброджування органічних відходів у біогазових установках є одним з найпрогресивніших, екологічно та економічно вигідних рішень для отримання енергії з накопичених органічних відходів у вигляді біогазу. Про це свідчить безліч наукових досліджень направлених на процес підвищення виходу біогазу та вироблення електричної енергії на біогазових установках [7]-[14].

Побічним ефектом зброджування органічних відходів у біогазових реакторах є отримання екологічно чистих добрив.

Використовуючи анаеробну обробку з органічних відходів можна отримати біогаз, здійснити його очищення та отримати біометан, який може замінити природний газ для використання як у власних потребах, так і для вироблення теплової та електричної енергії у когенераційних установках [15].

Процес анаеробного зброджування органічних відходів у біогазових реакторах є довготривалим, тому одними з основних методів інтенсифікації біогазового виробництва є перемішування та підігрів органічних відходів у процесі анаеробного бродіння у біогазових реакторах [16], [17].

Від енергоефективності процесів інтенсифікації анаеробного зброджування залежить рентабельність використання біогазової установки, через що вибір типу перемішувального та підігрівального пристроїв потребує особливої уваги з точки зору енергетичних витрат, які, у свою чергу, залежать від багатьох факторів. Внаслідок вище зазначених причин, у світі проводиться багато наукових досліджень у напрямку створення енергоефективного пристрою для перемішування та підігріву субстрату у біогазових реакторах.

## II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Енергетична ефективність біогазового виробництва залежить від величини енергетичних витрат на інтенсифікацію процесу.

Згідно з [17]-[20] на енергетичні витрати перемішувального пристрою мають суттєвий вплив його геометричні розміри та режим перемішування органічних відходів [16], [21]. З точки зору енергозбереження, найбільш перспективним обладнанням для інтенсифікації процесу зброджування органічних відходів є біогазові реактори із механічними мішалками [7], [8], [16], [18], [22], [23]. При створенні системи перемішування органічних відходів у біогазовому реакторі необхідно використовувати механічну мішалку з найбільшим раціональним співвідношенням площі проекції на речовину, що перемішується, та витраченої енергії на процес перемішування.

Температурний режим та рівномірність розподілення температурного поля по об'єму субстрату у біогазовому реакторі має суттєвий вплив на інтенсивність протікання анаеробного процесу. У роботах закордонних та вітчизняних науковців зустрічаються різноманітні системи для перемішування та підігріву сировини [6]-[13], [16]-[33].

Підігрів субстрату за допомогою електричних нагрівачів є найбільш ефективним, оскільки необхідна потужність є порівняно низькою. Проте, через можливе налипання субстрату на поверхню нагрівача, знижується рівномірність теплорозподілу [34], [35]. Проведені дослідження [31], [32], [34], [35] вказують на ефективність поєднання механічних перемішувальних пристроїв з електричними підігрівачами у один електротепломеханічний пристрій для перемішування та підігріву субстрату у біогазовому реакторі.

У роботі біогазового реактора можна виділити три основні етапи: процес початкового нагріву субстрату до температури зброджування; охолодження субстрату до температури вмикання підігріву; підтримка стабільної температури анаеробного зброджування.

Тому, стверджувати про енергетичну ефективність тієї чи іншої системи інтенсифікації біогазового виробництва можливо лише за результатами практичних та теоретичних досліджень енергетичних витрат для кожного з даних етапів.

Процес початкового нагріву субстрату до температури зброджування характеризується великим споживанням енергії, оскільки завантажений у біогазовий реактор органічний субстрат має початкову температуру нижчу за температурний режим процесу анаеробного бродіння.

Більшість країн світу покривають свої енергетичні потреби за рахунок імпорту енергетичних ресурсів із країн, які споживають меншу кількість енергоресурсів, ніж виробляють. Нестабільність ринків енергетичних ресурсів створює складності для прогнозуван-

ня зміни ціни, а це, у свою чергу, викликає невпевненість у майбутньому та нестабільність енергетичної політики країн [36].

Враховуючи вище розглянуте, та зважаючи на те, що тарифи на енергію та енергоресурси є головними факторами, котрі визначають сталий розвиток економіки країни [37], питання дослідження та створення енергетично ефективних систем інтенсифікації процесу анаеробного зброджування органічних відходів є актуальним питанням у будь-якій країні світу.

### III. МЕТА РОБОТИ

Експериментальне визначення кількості витрати енергії на процес початкового нагріву субстрату до температури анаеробного зброджування у біогазовому реакторі за використання електротепломеханічної системи з автоматичним керуванням для оцінки енергетичної ефективності процесу підігріву субстрату та рентабельності подальшої переробки утвореного біогазу у теплову та електричну енергію.

### IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ ТА АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Дослідження витрати енергії на процес початкового нагріву субстрату до температури зброджування було проведено на виготовленій експериментальній установці – біогазового реактора з електротепломеханічною системою з автоматичним керуванням процесу перемішування та підігріву субстрату. Зовнішній вигляд експериментальної установки наведено на рис. 1.

Для виготовлення біогазового реактора використано сталевий резервуар з наступними геометричними параметрами:  $H = 0.6 \text{ м}$ ,

$$d = 0.37 \text{ м}, V = 0.06 \text{ м}^3.$$

Утеплення реактора виконано шаром мінеральної вати товщиною 100 мм. Для забезпечення захисту утеплювального шару від потрапляння вологи та механічних пошкоджень біогазовий реактор коаксіально розміщено всередині сталевого резервуару більшого діаметру.

Вал електротепломеханічної системи перемішування та підігріву виконано із порожнистої сталеві труби. Лопаті виготовлено із сталевих пластин з внутрішніми пазами, в яких розміщено електричний гнучкий нагрівальний кабель із вуглецевого волокна.

Схема розташування та технічна характеристика вимірювального обладнання використаного у експериментальній установці біогазового реактора з електротепломеханічною системою для перемішування та підігріву субстрату наведена у [38].

У якості субстрату використовувалися попередньо подрібненні картопляні залишки масою 10 кг, розбавлені чистою водою у об'ємі 30 літрів,

завантаження у біогазовий реактора відбувається на 2/3 об'єму.

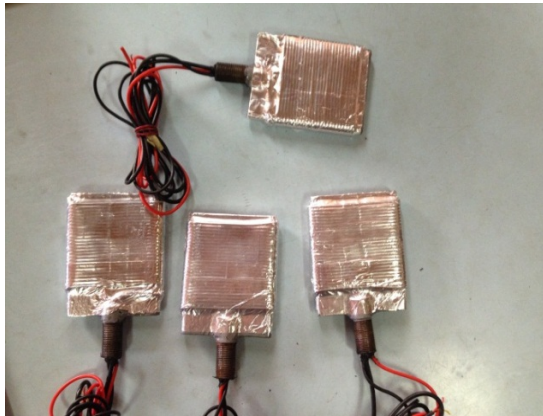


Рисунок 1. Зовнішній вигляд експериментальної біогазової установки

Під час проведення досліджень проводились реєстрація та аналіз отриманих експериментальних даних споживання енергії системою електричного підігріву при секційному розташуванні електричного нагрівального кабелю у лопатях електротепломеханічної системи з автоматичним керуванням для перемішування та підігріву субстрату у біогазовому реакторі (рис. 2).

Експериментальні дослідження проводилися наступним чином: підготовлений субстрат завантажувався у біогазовий реактор та залишався там на 12 годин з метою забезпечення врівноваження температури усіх об'єктів, котрі контактують із субстратом. Після вмикання системи електричного живлення установки, система автоматичного керування та реєстрації даних і проводилися експериментальні дослідження енергетичних витрат. Експеримент проводився у кліматичній зоні України, м. Київ.

Для вимірювання температури електричного нагрівального кабелю, субстрату та стінки реактора використано цифрові датчики температури DS18B20. Перетворення температури відбувається з точністю 12-біт, що відповідає точності вимірювання  $0.0625 \text{ }^\circ\text{C}$ . Вимірювання споживаного електричними нагрівачами та електричним двигуном струму з мережі виконано за допомогою трансформаторів струму SCT-013-030 з похибкою вимірювання 1%. Живлення датчиків виконано за допомогою лабораторного блоку живлення PeakTech 6225A [39], похибка вихідної напруги становить  $\leq 0.01\% \pm 1\text{mV}$ .

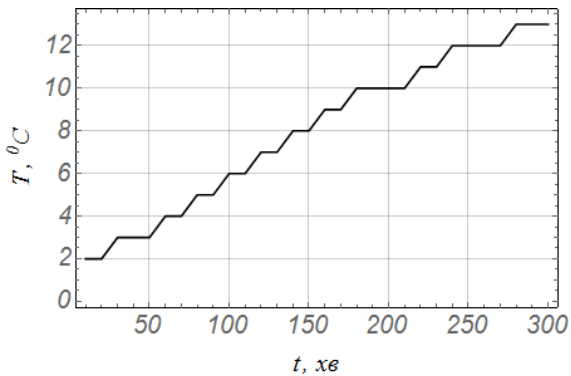


а)



б)

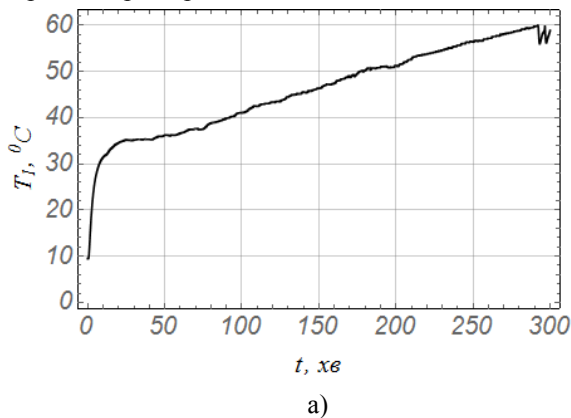
**Рисунок 2.** Лопаті, в яких розміщено електричний гнучкий нагрівальний кабель: а) розташування нагрівального кабелю на лопаті; б) лопать зі встановленим захисним кожухом



**Рисунок 3.** Температура навколишнього середовища за період експериментального дослідження

Температурні умови проведення експерименту відображено на графіку температури навколишнього середовища за період експериментального дослідження (рис.3).

Реєстрація значень вимірювальних датчиків відбувалась безперервно та автоматично за допомогою розробленої системи автоматичного контролю та реєстрації.



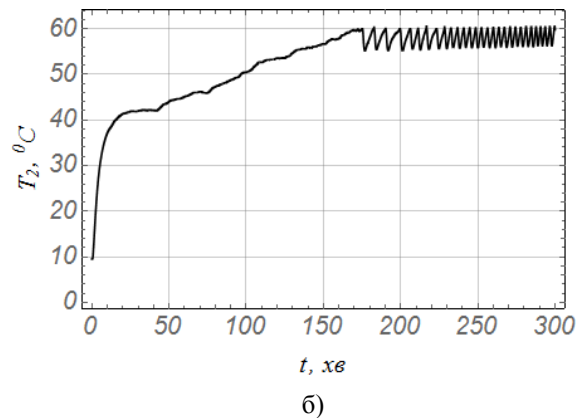
а)

Під час початкового нагріву субстрату до температури зброджування при розміщенні електричного нагрівального кабелю у лопатях двоярусної лопатевої мішалки, середнє значення температури навколишнього середовища становить  $T = 8 \text{ }^\circ\text{C}$  (рис. 3), а середнє значення вологості –  $\varphi = 70.2 \text{ } \%$ .

Результати експериментальних досліджень наведено у графічному вигляді на рис. 4, рис 5 та рис. 6.

З графічних залежностей зміни температури електричного нагрівального кабелю, розміщеного у лопатях мішалки (рис. 4 та рис. 5) помітно, що у перші 10 хвилин процесу нагріву відбувається стрімке зростання температури від значення  $9 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $31.26 \text{ }^\circ\text{C}$ .

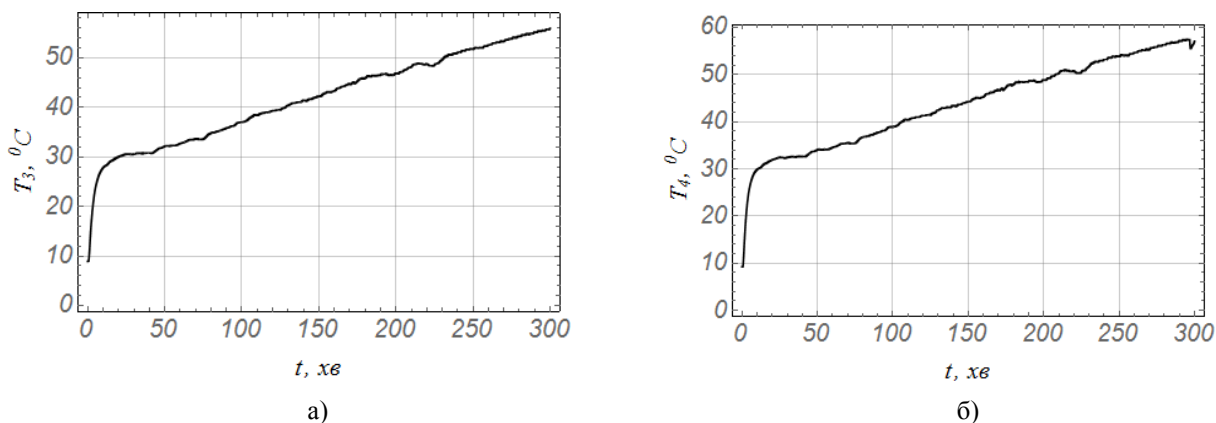
На проміжку часу  $\Delta t = 25...41 \text{ хв}$  (рис. 4, рис. 5), спостерігається рівномірна температура нагрівального кабелю, значення якої становить  $35 \text{ }^\circ\text{C}$ .



б)

**Рисунок4.** Графік зміни температури нижніх секцій електричного нагрівального кабелю розміщеного у лопатях електротепломеханічної системи: а) права нижня лопать; б) ліва нижня лопать





**Рисунок 5.** Графік зміни температури верхніх секцій електричного нагрівального кабелю розміщеного у лопатях електротепломеханічної системи: а) права верхня лопать; б) ліва верхня лопать

Після 41 хвилини відбувається плавне зростання температури до  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  (рис. 4 а, б). У момент часу  $\Delta t = 172\text{ хв}$  (рис. 4 б) та  $\Delta t = 291\text{ хв}$  (рис. 4 а) спрацьовує терморегулятор і вимикає підігрівальну секцію. У момент часу  $\Delta t = 174.5\text{ хв}$  (рис. 4 б) та  $\Delta t = 293.5\text{ хв}$  (рис. 4 а), температура нагрівального кабелю складає  $56\text{ }^{\circ}\text{C}$ , після чого напруга живлення подається на секцію нагріву і температура кабелю починає зростати (рис. 4 а та б), і в подальшому підтримується терморегулятором у межах  $58\text{--}60\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

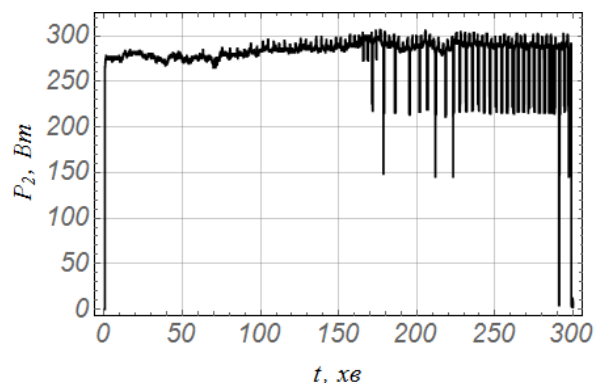
Середнє значення температури електричного нагрівального кабелю, розміщеного у лопатях мішалки, в період початкового нагріву становить для нижніх секцій –  $46.04\text{ }^{\circ}\text{C}$  (рис. 4 а),  $52.27\text{ }^{\circ}\text{C}$  (рис. 4 б), для верхніх секцій відповідно –  $41.85\text{ }^{\circ}\text{C}$  (рис. 5 а),  $43.8\text{ }^{\circ}\text{C}$  (рис. 5 б). Середнє значення температури електричних нагрівальних кабелів, розміщених у нижніх лопатях мішалки, становить  $49.155\text{ }^{\circ}\text{C}$ , у верхніх лопатях –  $42.825\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Загальне середнє значення температури нагрівального кабелю, розміщеного у лопатях мішалки, становить  $45.99\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Порівнюючи між собою середні значення температури електричного нагрівального кабелю секцій нагріву верхніх та нижніх лопатей мішалки помітно, що значення температури нижніх лопатей більше на 12.9%.

Встановлено також (рис. 4 та рис. 5), що зміна температури електричного нагрівального кабелю у кожній лопаті відбувається не однаково. Це пояснюється процесом тепловіддачі та наявністю на поверхні лопаті забруднення, товщину якого у процесі підігріву передбачити дуже складно. Проте, використовуючи розроблену систему автоматичного керування, створено умови, за яких відбувається терморегуляція кожної секції нагріву окремо, що і

спостерігається на графічних залежностях (рис. 4 а, б).



**Рисунок 6.** Графік витраченої потужності секціями електричного нагрівального кабелю, розміщеного у лопатях мішалки

З графічної залежності (рис. 6), помітно, що за використання електротепломеханічної системи при розміщенні електричного нагрівального кабелю у лопатях мішалки, у момент вмикання нагрівальних секцій виникає стрибкоподібне зростання потужності до значення ( $P_2 = 278\text{ Вт}$ ) з подальшим зростанням до значення номінальної потужності ( $P_2 = 293\text{ Вт}$ ). У момент часу ( $\Delta t = 172\text{ хв}$ ) спостерігається зниження споживаної потужності електричними нагрівачами до значення ( $P_2 = 219\text{ Вт}$ ), що зумовлено досягненням секції нагріву гранично допустимої температури (рис. 4 б).

У подальшому спостерігається періодичне зниження споживаної електричними нагрівачами потужності до значення ( $P_2 = 219\text{...}150\text{ Вт}$ ), що зумовлено вмикання-вимикання секцій підігріву вмонтованих у лопаті електротепломеханічної системи (рис. 4, рис. 5), Дана картина спостерігається аж до повного вимикання системи підігріву субстрату.

В цілому система підігріву, яка виконана із електричного нагрівального кабелю, що вмонтований у лопаті двоярусної лопатевої мішалки, витрачає енергію  $W_2 = 4.99 \cdot 10^6$  Дж на процес початкового підігріву субстрату у біогазовому реакторі з  $9.3$  °C до  $35.8$  °C.

Тривалість самого підігріву складає 300 хв., при цьому середнє значення споживаної потужності електричними нагрівачами складає  $P_2 = 277.4$  Вт.

Аналіз енергетичних витрат на процес підігріву субстрату у біогазовому реакторі показав, що до моменту вимикання секції підігріву, тобто (рис. 4 б) за період часу  $\Delta t = 172$  хв, системою підігріву було використано  $W_2 = 2.9 \cdot 10^6$  Дж, тоді як, після початку роботи терморегулятора у момент часу  $\Delta t = 172$  хв та до моменту вимикання системи підігріву  $\Delta t = 300$  хв було використано  $W_2 = 2.09 \cdot 10^6$  Дж.

Порівнюючи між собою отримані експериментальним шляхом значення витраченої енергії до початкового моменту роботи терморегулятора та після, помітно, що розділення електротепломеханічної системи на секції підігріву, коли кожна лопать є окремою секцією з власним автоматичним регулюванням температури нагрівального кабелю вмонтованого у відповідну секцію, споживання електричної енергії відбувається на 27.9% менше у порівнянні з моментом роботи системи підігріву без роботи терморегуляторів.

## V. ВИСНОВКИ

У результаті проведеного експериментального дослідження та аналізу отриманих даних встановлено, що не зважаючи на однакову потужність нагрівальних секцій зміна температури електричного нагрівального кабелю у кожній лопаті відбувається не однаково, це пояснюється процесом тепловіддачі та наявністю на поверхні лопаті забруднення, товщину якого у процесі підігріву передбачити дуже складно.

Порівнюючи між собою середні значення температури електричного нагрівального кабелю секцій нагріву верхніх та нижніх лопатей мішалки встановлено, що значення температури нижніх лопатей більше на 12.9%.

Авторами у ході експериментальних досліджень встановлено, що за використання електричного нагрівального кабелю, який вмонтований у лопаті двоярусної лопатевої мішалки, система підігріву витрачає енергію  $W_2 = 4.99 \cdot 10^6$  Дж на процес початкового підігріву субстрату до температури анаеробного зброджування у біогазовому реакторі. Тривалість самого підігріву складає 300 хв.

У ході експериментальних досліджень встановлено енергетичну ефективність розділення електротепломеханічної системи на секції підігріву,

коли кожна лопать є окремою секцією з власним автоматичним регулюванням температури електричного нагрівального кабелю, вмонтованого у відповідну секцію. При цьому споживання електричної енергії зменшується на 27.9%.

Проведені експериментальні дослідження витрати енергії на процес початкового нагріву субстрату вказують на ефективність використання електротепломеханічної системи для підігріву субстрату.

За використання електротепломеханічної системи для підігріву субстрату здійснюється процес автоматичного регулювання режиму роботи окремих секцій, що забезпечує рівномірний розподіл температури у об'ємі реактора та недопущення перевищення гранично допустимої для процесу бродіння температури нагрівальної поверхні вище  $60$  °C.

Отримані результати можуть бути використані при проектуванні, будівництві та модернізації систем інтенсифікації біогазового виробництва, а саме, перемішування та підігріву субстрату у біогазових установках. Це дозволить підвищити енергетичну ефективність процесу утворення біогазу та рентабельність подальшої його переробки у теплову та електричну енергію.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Национальный кадастр антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов в Украине за 1990–2007 гг. [Электронный ресурс] / М.В. Березницкая, О.В. Бутрим, Г.Г. Панченко. – К.: Министерство охраны окружающей природной среды Украины, 2008. – 319 с. Режим доступа: [http://climategroup.org.ua/upl/Nac\\_zvit\\_p\\_parn\\_gaz\\_y\\_90\\_07.pdf](http://climategroup.org.ua/upl/Nac_zvit_p_parn_gaz_y_90_07.pdf).
- [2] Ch. McCombie, M. Jefferson. (2016). Renewable and nuclear electricity: Comparison of environmental impacts, *Energy Policy*, 96, 758-769.
- [3] D. Weisser. (2007). A guide to life-cycle greenhouse gas (GHG) emissions from electric supply technologies, *Energy*, 32, 1543-1559.
- [4] *IEA Statistics*, 2016.
- [5] D.-A. Ciupăgeanu, G. Lăzăroiu, M. Tîrșu, (2017). Carbon dioxide emissions reduction by renewable energy employment in Romania, *2017 International Conference on Electromechanical and Power Systems (SIELMEN)*, 281-285.
- [6] Нездойминов, В.И. Математическое описание основных факторов, влияющих на формирование взвешенного слоя осадка в илоотделителе [Текст] / В.И. Нездойминов, В.И. Зятин, В.С. Рожков // Сучасне промислове та цивільне будівництво, 2016. – №2. – 51-58 с.
- [7] Куріс, Ю.В. Біоенергетичні установки. Обладнання та технології переробки органічних енергоресурсів [Текст] / Ю.В. Куріс: монографія.



- Запоріжжя: ЗДІА, 2012. – 348 с.
- [8] Веденев, А.Г., Веденева, Т.А. Руководство по биогазовым технологиям [Текст]. «ДЭМИ», 2011. – 84 с.
- [9] Baader V., Donet E., Brennderfer M. (1982). Biogas. Theory and practice. 148.
- [10] Семінський О. О. Дослідна установка для одержання біогазу з відходів целюлозно-паперового виробництва / О. О. Семінський, Ю. В. Мазепа // VI Всеукр. наук.-практ. конф. студентів, аспірантів і молодих вчених «Обладнання хімічних виробництв і підприємств будівельних матеріалів»: тези доп. – К.: НТУУ «КПІ», 2010. – С. 96.
- [11] Polischuk V.N., Titova L.L., Shvorov S.A., Gunchenko Y.A. (2019). Estimation of Biogas Yield and Electricity Output during Cattle Manure Fermentation and Adding Vegetable Oil Sediment as a Co-substrate. In: *Problemele Energeticii Regionale*. 43(2), 117-132.
- [12] Vasilevich S., Malko M., Shevchik N. (2016). The Use of the Biomass in the Republic of Belarus. Status and Prospects of Development. In: *Problemele Energeticii Regionale*. 32(3), 72–77.
- [13] Marks, S., Dach, J., Fernandez Morales, F.J., Mazurkiewicz, J., Pochwatka, P., Gierz, Ł. (2020). New Trends in Substrates and Biogas Systems in Poland. *Journal of Ecological Engineering*, 21(4), 19-25. DOI: /10.12911/22998993/119528.
- [14] Zablodskiy M., Kozyrskiy V., Zhylytsov A., Savchenko V., Sinyavsky O., Spodoba M., Klendiy G., Klendiy P. (2020). Electrochemical Characteristics of the Substrate based on Animal Excrement During Methanogenesis With the Influence of a Magnetic Field. *2020 IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, 530-535.
- [15] Atanasoae P., Pentiu R.D. (2017). The qualification of electricity production in high efficiency cogeneration for the access to the support scheme through green certificates. In: *Problemele Energeticii Regionale*. 35(3), 58-61.
- [16] Ратушняк, Г.С., Анохіна, К.В., Джеджула, В.В. Дослідження параметрів процесу перемішування органічної маси в біогазовій установці з вертикальним пропелерним перемішувачем. – Вінниця: ВНТУ, 2010. – 170 с.
- [17] Ward A.J., Hobbs P.J., Holliman P.J., Jones D.L. (2008). Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources. *Bioresour. Technol.* 99, 7928-7940.
- [18] Aneur H. (2016). Mixing of complex fluids with flat and pitched bladed impellers: effect of blade attack angle and shear-thinning behavior. *Food Bioprod. Process.* 99, 71-77.
- [19] Червоний, І.Ф., Куріс, Ю.В. Дослідження пристроїв та удосконалення процесів перемішування в біогазових установках. – Х.: Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит, 2012. – №2, 96.
- [20] Foukrach M., Bouzit M., Aneur H. (2020). Effect of Agitator's Types on the Hydrodynamic Flow in an Agitated Tank. *Chin. J. Mech. Eng.* 33, 37. DOI: 10.1186/s10033-020-00454-2.
- [21] Сподоба, М.О., Заблодський, М.М., Радько І.П. Основні складові методології побудови заглибного електромеханічного перетворювача для біогазових комплексів // V Міжнародна науково-практична конференція присвячена пам'яті професора Віктора Михайловича Синькова «Проблеми та перспективи розвитку енергетики, електротехнологій та автоматики в АПК», – К.: НУ-БІП, 2019.
- [22] Aneur H. (2018). Modifications in the Rushton turbine for mixing viscoplastic fluids. *J. Food Eng.* 223, 117-125.
- [23] Ратушняк, Г.С., Лялюк, О.Г., Кошечев, І.А. Біогазові установки з відновлюваними джерелами енергії термостабілізації процесу ферментації біомаси [Текст] / Г.С. Ратушняк, О.Г. Лялюк, І.А. Кошечев: монографія. – Вінниця, ВНТУ, 2017. – 88 с.
- [24] Трахунова, И.А. Эффективность гидравлического перемешивания при различных способах загрузки органического субстрата в реактор БГУ [Текст] / И.А. Трахунова, Ю.В. Караева // Молодой ученый, 2012. – №4. – 45-50 с.
- [25] Marks S., Jezowska A., Kozłowski K., Dach J., Wilk B., Fudala-Książek S. (2017) Review of mixing systems for fermentation liquid used in biogas plants. *Technika Rolnicza Ogrodnicza Leśna*, 6, 24-26.
- [26] Караева Ю.В. Модифицированная система гидравлического смешения в метантенке биогазовой установки. Вестник Казанского технологического университета – Вестник Казанского технологического университета, 2013, №1, с. 199-201.
- [27] Шаяхметов, Р.Г. Исследование способов перемешивания в метантенках / Р.Г. Шаяхметов // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. – М.: Издво ООО «Издательский дом «Орион», 2011/4(40). – С.18-20.
- [28] Шаяхметов, Р.Г. Влияние конструкций метантенков на интенсификацию процессов анаэробного сбраживания / Р.Г. Шаяхметов // Молодой ученый. – Чита: Изд-во ООО «Молодой ученый». – №5(28). – 2011. – Том I. – С.113-116.
- [29] Pham C.H., Vu C.C., Sommer S.G., Bruun S. (2014). Factors Affecting Process Temperature and Biogas Production in Small-scale Rural Biogas Digesters in Winter in Northern Vietnam. 27(7), 1050–1056.
- [30] Rashed M. B. (2014). The Effect of Temperature on the Biogas Production from Olive Pomace. *University Bulletin ISSUE*. 3(16), 135-148.
- [31] Заблодський М. М., Сподоба М. О. Обґрунтування створення електротепломеханічної системи перемішування та підігріву біомаси. *Енергетика та автоматика*, 0(5). Київ. 2020. – 136-148. doi: http://dx.doi.org/10.31548/energiya2020.05.

- 136
- [32] Заблодський М. М., Сподоба М. О. Визначення енергетично ефективного рівня швидкості перемішувального органу електромеханічної системи. Електромеханічні і енергозберігаючі системи. 4(52). Кременчук, 2020. – 17-26 с. DOI: 10.30929/2072-2052.2020.4.52.17-26
- [33] Сподоба М.О., Заблодський М.М. Залежність енергетичних витрат від типу використаної механічної мішалки у біогазовому реакторі. Електротехніка та електроенергетика. Випуск 1. Запоріжжя, 2021. – 26-33 с. <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2021-1-3>
- [34] Zablodskiy M., Spodoba M. (2021). Dynamic Analysis of Energy Consumption During Substrate Fermentation in a Biogas Reactor, 2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek), 147-152, doi: 10.1109/KhPIWeek53812.2021.9569995.
- [35] Z. Mykola, S. Mykhailo. (2020). Mathematical Model Of Thermal Processes During The Fermentation Of Biomass In A Biogas Reactor, 2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek), 227-231.
- [36] Berzan V., Postolati V., Bykova E., Cernei M., Volconovich L. (2019). Trends and Risks in the Natural Gas Supply of the Republic of Moldova Tendițe și riscuri în asigurarea cu gaze naturale a Republicii Moldova. 42(1-3), 94-114. 10.5281/zenodo.3242741.
- [37] Postolatiy V., Babich V. (2018). Tariff Policy in the Formation of the Price of Thermal Energy. Problemele energeticii regionale, 38(3), 170–181.
- [38] Заблодський М. М., Сподоба М. О. Методика проведення експериментальних досліджень біогазового реактора з заглибною комбінованою системою перемішування та електричного підігріву. Матеріали ІХ Міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми сучасної енергетики і автоматизації в системі природокористування (теорія, практика, історія, освіта)», Київ, 19-22 травня 2020.
- [39] Zablodskiy M.M., Spodoba M.O. Power supply of measuring sensors when performing experimental studies of electrical thermal mechanical system. *Energy and Automation*, 0(4), Kyiv, pp. 39-48. doi:10.31548/energiya2021.04.039

Стаття надійшла до редакції 19.02.2022

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАСХОДА ЭНЕРГИИ НА ПРОЦЕСС НАЧАЛЬНОГО НАГРЕВА СУБСТРАТА ЗА ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРОТЕПЛОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

ЗАБЛОДСКИЙ Н.Н.

д-р техн. наук, профессор кафедры электротехники, электромеханики и электротехнологий, УНИ энергетики, автоматизации и энергосбережения, Национального университета биоресурсов и природопользования Украины, Киев, Украина, e-mail: zablodskiyann@gmail.com;

СПОДОБА М.А.

аспирант кафедры электротехники, электромеханики и электротехнологий, УНИ энергетики, автоматизации и энергосбережения, Национального университета биоресурсов и природопользования Украины, Киев, Украина, e-mail: spmisha@ukr.net;

СПОДОБА А.А.

канд. техн. наук (PhD), ассистент кафедры конструирования машин и оборудования, Национального университета биоресурсов и природопользования Украины, Киев, Украина, e-mail: sp1309@ukr.net;

**Цель работы.** Экспериментальное определение расхода энергии на процесс начального нагрева субстрата до температуры сбраживания в биогазовом реакторе при использовании электротепломеханической системы с автоматическим управлением для оценки энергетической эффективности процесса подогрева субстрата и рентабельности дальнейшей переработки образовавшегося биогаза в тепловую и электрическую энергии.

**Методы исследования.** Экспериментальные исследования динамики изменения температуры электрического нагревательного кабеля, размещенного в электротепломеханической системе, определения длительности процесса и израсходованной энергии начального подогрева субстрата, обработка и сравнительный анализ полученных массивов данных, обобщение полученных результатов.

**Полученные результаты.** В формировании современной энергетической системы важную роль играют биогазовые технологии, рентабельность которых напрямую зависит от энергоэффективности процессов интенсификации анаэробного сбраживания. Процесс анаэробного сбраживания отходов длительный, поэтому одним из основных методов интенсификации биогазового производства является перемешивание отходов в процессе анаэробного брожения. Существует необходимость повышения энергоэффективности процессов интенсификации анаэробного сбраживания и рентабельности дальнейшей переработки биогаза в тепловую и электрическую энергию. Способы повышения энергоэффективности в основном заключаются в сокращении времени подогрева субстрата в биогазовом реакторе, уменьшении расхода электрической энергии на процесс

термостабілізації анаеробного сбраживання, структурном сочетанні енергетически ефективних систем перемішвання і підогрева сировини в реакторах, впровадженні систем автоматичного виробництва. Реалізація цих дійствий дозволить установити оптимальні геометричні розміри електротепломеханічної системи з автоматичним управлінням для перемішвання і підогрева субстрата в біогазовому реакторі і суттєво підвищить енергетическую ефективність біогазових установок і наступуючу переробку образованного біогазу в теплову і електрическую енергію.

**Научная новизна.** В результаті проведеного експериментального дослідження і аналізу отриманих даних встановлено, що при однаковій потужності нагрівальних секцій змінення температури електрического кабелю в кожній лопасті відбувається не однаково. Авторами встановлено, що середнє значення температури секцій електрического нагрівального кабелю нижніх лопастей більше на 12.9% по порівнянню з верхніми лопастями електротепломеханіческой системи. Авторами в ході експериментальних досліджень встановлено, що при використанні системи підогрева, виконаної з електрического нагрівального кабелю, вмонтованого в лопасті двухъярусной лопатной мешалки, расходуеться  $W_2 = 4.99 \cdot 10^6$  Дж на процес початкового підогрева субстрата з 9.3 до 35.8 °C в біогазовому реакторі об'ємом 40 літрів. Продовжительность самого підогрева складає 300 мин. В ході експериментальних досліджень авторами була встановлена енергетическая ефективність от розділення електротепломеханіческой системи на секції підогрева, когда каждая лопасть является отдельной секцией с собственным автоматическим регулюванням температури електрического нагрівального кабелю вмонтованого в соответствующую секцію, при этом потребление електрической енергії зменшується на 27.9%.

**Практическая ценность.** Отримані результати можуть використовуватися при проектуванні, будівництві і модернізації систем інтенсифікації біогазового виробництва, а іменно, перемішванні і підогреві субстрата в біогазових установках. Это дозволить підвищити енергетическую ефективність процесу образовання біогазу і рентабельність його переробки в теплову і електрическую енергію.

**Ключевые слова:** експеримент; енергоефективность; начальный нагрев субстрата; електротепломеханіческая система; перемішвання; енергопотребление; температура сбраживання.

## EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF ENERGY CONSUMPTION FOR THE PROCESS OF INITIAL HEATING OF A SUBSTRATE FOR THE USE OF ELECTRIC HEAT-MECHANICAL SYSTEM

ZABLODSKIY N.N. Doctor of Engineering, Professor, Department of Electrical Engineering, Electromechanics and Electrotechnology, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine. e-mail: zablodskiyinn@gmail.com;

SPODOBA M.O. Post-graduate, Department of Electrical Engineering, Electromechanics and Electrotechnology, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine. e-mail: spmisha@ukr.net;

SPODOBA A.O. Candidate of Technical Sciences (PhD), Assistant, Department of Design of Machines and Equipment, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine, e-mail: sp1309@ukr.net;

**Purpose.** Experimental determination of energy consumption for the process of the substrate initial heating to the temperature of anaerobic digestion in a biogas reactor using an electrothermal-mechanical system with automatic control to assess the energy efficiency of the substrate heating process and the profitability of further processing of the resulting biogas into thermal and electrical energy.

**Methodology.** Experimental studies of the dynamics of temperature changes in the heating cable placed in electrothermal-mechanical system, determining the duration of the process and the energy consumed by the substrate initial heating, processing and analysis of the obtained data arrays, the obtained results summarizing.

**Findings.** Biogas technologies play an important role in the formation of a modern energy system, the profitability of which directly depends on the energy efficiency of anaerobic digestion intensification. The process of waste digestion is long, so one of the main methods of the biogas production intensification is the mixing of waste in the process of anaerobic fermentation. There is a need to improve the energy efficiency of anaerobic digestion intensification and the profitability processing of biogas into heat and electricity. Ways to improve energy efficiency mainly consist in reducing the time of the substrate heating in a biogas reactor, reducing the consumption of electrical energy for the process of thermal stabilization of anaerobic digestion, structural combination of energy-efficient systems for mixing and heating raw materials in reactors, and introducing automatic production systems. The implementation of these actions will make it possible to establish the optimal geometric dimensions of an electrothermal-mechanical system with automatic

control for mixing and heating the substrate in a biogas reactor and significantly increase the energy efficiency of biogas plants and the subsequent processing of the resulting biogas into thermal and electrical energy.

**Originality.** As a result of the experimental study and analysis of the data obtained, it was found that with the same power of the heating sections, the change in the temperature of the electric cable in each blade does not occur in the same way. The authors found that the average value of the temperature of the sections of the electric heating cable of the lower blades is 12.9% higher compared to the upper blades of the electrothermal-mechanical system. In the course of experimental studies, the authors found that when using a heating system made of an electric heating cable mounted in the blades of a two-tier paddle mixer, it consumes  $W_2 = 4.99 \cdot 10^6$  J, on the process of initial heating of the substrate from 9.3 before 35.8 °C in a biogas reactor with a volume of 40 liters. The duration of the heating itself is 300 minutes. In the course of experimental studies, the authors established the energy efficiency from dividing the electrothermal-mechanical system into heating sections, when each blade is a separate section with its own automatic temperature control of the electric heating cable mounted in the corresponding section, while the consumption of electrical energy is reduced by 27.9%.

**Practical value.** The results obtained can be used in the design, construction and modernization of biogas production intensification systems, namely, mixing and heating of the substrate in biogas plants. This will improve the energy efficiency of the biogas formation process and the profitability of its processing into heat and electricity.

**Keywords:** experiment; energy efficiency; initial heating of the substrate; electrothermal-mechanical system; mixing; energy consumption; fermentation temperature

## REFERENCE

- [1] Bereznitskaya, M.V., Butrim, O.V., Panchenko, G.G. (2008). Natsionalny y kadastrantro po gennykh vybrosovizistochnikoviyab sorbtsiipoglotitelyami-pannikovvykhgazovvUkraineza 1990–2007 gg. MinisterstvookhranyokruzhayushcheyprirodnoysredyUkrainy, Kyev 2008, 319 p. Rezhimdstupa: [http://climategroup.org.ua/upl/Nac\\_zvit\\_p\\_parn\\_gazy\\_90\\_07.pdf](http://climategroup.org.ua/upl/Nac_zvit_p_parn_gazy_90_07.pdf). (inUkrainian)
- [2] Ch. McCombie, M. Jefferson. Renewable and nuclear electricity: Comparison of environmental impacts, *Energy Policy*, 2016, no. 96, pp. 758-769.
- [3] D. Weisser. A guide to life-cycle greenhouse gas (GHG) emissions from electric supply technologies, *Energy*, 2007, no. 32, pp. 1543-1559.
- [4] *IEA Statistics*, 2016.
- [5] D.-A. Ciupăgeanu, G. Lăzăroiu, M. Tîrșu. (2017). Carbon dioxide emissions reduction by renewable energy employment in Romania, 2017 *International Conference on Electromechanical and Power Systems (SIELMEN)*, pp. 281-285.
- [6] Nezdoyminov, V. I., Zyatina, V. I., Rozhkov, V. S. (2016). Matematicheskoye opisaniye osnovnykh faktorov. Vliya yushchikhna formirovaniye vzveshennogosloya osadkavi lootdelitele. Sucha snepromislove tatsivilne budivnitstvo, No.2, pp. 51-58. (in Ukrainian).
- [7] Kuris Yu.V. (2012). Bioyenergetichni ustanovki. Obladnannya tatekhnologii pererobki organov misnikhen ergoresursiv. Zaporizhzhya: ZDIA, 348 p. (in Ukrainian).
- [8] Vedenev, A.G., Vedeneva, T.A. (2011). Rukovodstvo po biogazovy mtekhno logiyam. 2011, «DEMI», 84 p.
- [9] Baader, V., Donet, E., Brennderfer, M. (1982). Biogas. Theoryandpractice. 148 p.
- [10] Seminsky, O.O, Mazepa, Yu.V. (2010). Doslidna ustanovka dlya oderzhannya biogazuz vidhodiv celyulozno-paperovogo virobniictva. VI Vseukr. nauk.-prakt. konf. studentiv, aspirantiv i molodih vchenih «Obladnannya himichnih virobniictv i pidpriemstv budivel'nih materialiv» Ukraine, NTUU “KPI”, 96 p. (in Ukrainian).
- [11] Polischuk V.N., Titova L.L., Shvorov S.A., Gunchenko Y.A. (2019). Estimation of Biogas Yield and Electricity Output during Cattle Manure Fermentation and Adding Vegetable Oil Sediment as a Co-substrate. In: *Problemele Energeticii Regionale*. Vol. 43, No. 2, pp. 117-132.
- [12] Vasilevich, S., Malko, M., Shevchik, N. (2016). The Use of the Biomass in the Republic of Belarus. Status and Prospects of Development. In: *Problemele Energeticii Regionale*. Vol. 32, No. 3, pp. 72–77.
- [13] Marks, S., Dach, J., Fernandez Morales, F.J., Marzurkiewicz, J., Pochwatka, P., Gierz, L. (2020). NewTrends inSubstratesand Biogas Systems in Poland.*Journal of Ecological Engineering*, Vol. 21, No. 4, pp. 19-25. DOI: /10.12911/22998993/119528.
- [14] Zablodskiy, M., Kozyrskiy V., Zhyltsov, A., Savchenko, V., Sinyavsky, O., Spodoba, M., Klendiy, G., Klendiy, P. (2020). Electrochemical Characteristics of the Substrate based on Animal Excrement During Methanogenesis With the Influence of a Magnetic Field. *2020 IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, pp. 530-535.
- [15] Atanasoae, P., Pentiu, R.D. (2017). The qualification of electricity production in high efficiency cogeneration for the access to the support scheme through green certificates. In: *Problemele Energeticii Regionale*. Vol. 35, No. 3, pp. 58-61.
- [16] Ratushnyak, G.S., Anokhina, K.V., Dzhedzhula, V.V. (2010). Doslid zhennya parametriv protsesu peremishuvannya organichno masiv biogazov iyustanovtsi zvertik alnimpro pelernimperemi shuvachem. Vinnitsya, VNTU, 170 p. (inUkrainian)

- [17] Ward, A.J., Hobbs, P.J., Holliman, P.J., Jones, D.L. (2008). Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources. *Bioresour. Technol.* No. 99, pp. 7928-7940.
- [18] Ameer H. (2016). Mixing of complex fluids with flat and pitched bladed impellers: effect of blade attack angle and shear-thinning behavior. *Food Bioprod. Process.* No. 99, pp. 71-77.
- [19] Chervoniy, I.F., Kuris, Yu.V. (2012). Doslidzhennya pristroi vtaudosko nalennyaprot sesivpere mishuvannyavbi ogazovikhustanovkakh. *Energoberezhniye. Energetika. Energoaudit*, No. 2, 96 p. (in Ukrainian)
- [20] Foukrach, M., Bouzit, M., Ameer H. (2020). Effect of Agitator's Type on the Hydrodynamic Flow in an Agitated Tank. *Chin. J. Mech. Eng.* No. 33, 37 p. DOI: 10.1186/s10033-020-00454-2.
- [21] Spodoba, M.O., Zablodskiy, M.M., Radko, I.P. (2019). Osnovni skladovi metodologii pobudo vizaglibnogo elektromekha nichnogopere tvorvy uvacha dly abiogazovikh kompleksiv. VMizh nar odnanaukovo-practic hnakonferentsi yaprisvy achenapam'yati profesora Viktora Mikhaylovicha Sinkova «Problemitaperspektiviro zvitku energetiki. Elektrotekhnolo giytaa avtomatikiv APK», Kyiv, NUBiP. (in Ukrainian)
- [22] Ameer, H. (2018). Modification of the Rushton turbine form in viscous plastic fluids. *J. Food Eng.*, 223, pp. 117-125.
- [23] Ratushnyak G.S., Lyalyuk O.G., Koshchev I.A. (2017). Biogazovi ustanovki zvidnovlyuvani midzherela mienergiy termostabilizatsiy protsesufermentatsiy biomasi. Vinnitsya: VNTU, 88 p. (in Ukrainian)
- [24] Trakhunova I.A., Karayeva Yu.V. (2012). Effektivnost gidravlichesko goperem eshivaniyaprirazlichnykh sposobakh zagruzki iorganicheskogo substratavreaktor BGU. *Molodoyuchenyy*, No.4, pp. 45-50. (in Russian)
- [25] Marks, S., Jezowska, A., Kozłowski, K., Dach, J., Wilk, B., Fudala-Książek, S. (2017). Review of mixing systems of fermentation liquid used in biogas plants. *Technika Rolnicza Ogrodnicza Leśna*, No. 6, pp. 24-26.
- [26] Karaeva Yu.V. (2013). Modificiro vannayasi stmagidravli cheskogoperemesh ivaniyavmeta ntenkebio gazovojustanovki. *Vestnik Kazanskogotekhnologicheskogouniversiteta*, No.1, pp. 199-201. (in Russian)
- [27] Shayakhmetov, R.G. (2011). Issledovanie sposobov pere meshivaniyav metantenkakh. *Vodoochistka Vodopodgotovka Vodospabzhenie*. Moscow, Vol. 40, No. 4, pp. 18-20. (in Russian)
- [28] Shayakhmetov, R.G. (2011). Vliyanie konstrukcij metantenkov na intensiy fikatsiyu p rocessovanaer obnogospabzheniya. *Molodoyuchenyy*, Vol. 28, No. 5, pp. 113-116. (in Russian)
- [29] Pham, C.H., Vu, C.C., Sommer, S.G., Bruun, S. (2014). Factors Affecting Process Temperature and Biogas Production in Small-scale Rural Biogas Digesters in Winter in Northern Vietnam. Vol. 27, No.7, pp. 1050-1056.
- [30] Rashed, M. B. (2014). The Effect of Temperature on the biogas Production from Olive Pomace. *University Bulletin ISSUE*. Vol. 3, No. 16 pp. 135-148.
- [31] Zablodsky, M.M., Spodoba, M.O. (2020). Obgruntuvannya nnyastvorenn yaelektroteplom ekhanichnoy sistemy peremishuvan nyatapy digrivubiomasi. *Energetika ta avtomatika*, Kyiv, No.5, pp. 136-148. (in Ukrainian)
- [32] Zablodsky M.M., Spodoba M.O. (2020). Vznachennya energetichno efektyvnogo rivnya shvidkosti peremishuvannogo organu elektromekhanichnoy sistemy. *Elektromekhanichni i energozberigayuchi sistemi*. Kremenchuk, Vol. 52, No. 4, pp. 17-26. DOI: 10.30929/2072-2052.2020.4.52.17-26 (in Ukrainian)
- [33] Spodoba, M.O., Zablodsky, M.M. (2021). Zalezhnist' energetichnih vitrat vid tipu vikoristanoy mekhanichnoy mishalki u biogazovomu reaktori. *Elektrotekhnika ta elektroenergetika*, Zaporizhzhya, No. 1, pp. 26-33. (in Ukrainian)
- [34] Zablodskiy, M., Spodoba, M. (2021). Dynamic Analysis of Energy Consumption During Substrate Fermentation in a Biogas Reactor, *2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, pp. 147-152, doi: 10.1109/KhPIWeek53812.2021.9569995.
- [35] Mykola, Z., Mykhailo, S. (2020). Mathematical Model Of Thermal Processes During The Fermentation Of Biomass In A Biogas Reactor, *2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, pp. 227-231.
- [36] Berzan, V., Postolati, V., Bykova, E., Cernei, M., Volconovich, L. (2019). Trends and Risks in the Natural Gas Supply of the Republic of Moldova Tendițe și riscuri în asigurarea cu gaze naturale a Republicii Moldova. Vol. 42, No. 1-3, pp. 94-114. 10.5281/zenodo.3242741.
- [37] Postolatiy, V., Babich, V. (2018). Tariff Policy in the Formation of the Price of Thermal Energy. *Problemele energeticii regionale*, Vol. 38, No. 3, pp. 170-181.
- [38] Zablodsky, M.M., Spodoba, M.O. (2020). Metodika provedennya eksperimental'nykh doslidzhen' biogazovogo reaktora z zaglibnoyu kombinovanoyu sistemoyu peremishuvannya ta elektrichnogo pidigrivu. *Proceedings of the IX International Scientific and Technical Conference "Problems of modern energy and automation in the system of nature management (theory, practice, history, education)"*, Kyiv.
- [39] Zablodskiy, M.M., Spodoba, M.O. Power supply of measuring sensors when performing experimental studies of electrical thermal mechanical system. *Energy and Automation*, 0(4), Kyiv, pp. 39-48. doi:10.31548/energiya2021.04.03