



*Науковий журнал*

# **ЕЛЕКТРОТЕХНІКА та ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА**

**№1'2021**

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

*Виходить 4 рази на рік*

Запоріжжя

2021

Головний редактор д-р техн. наук  
Яримбаш Д.С.  
Заст. гол. редактора д-р техн. наук  
Тиховод С.М.  
Відповідальний  
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; **Міліх В. І.**, д-р техн. наук, проф., Національний технічний університет «ХПІ», м. Харків, Україна; **Жильцов А. В.**, д-р техн. наук, проф., Національний університету біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна; **Паранчук Я. С.**, д-р техн. наук, проф., Національний університет "Львівська політехніка", м. Львів, Україна; **Толочко О. І.**, д-р техн. наук, проф., Київський політехнічний інститут імені І. Сікорського, м. Київ, Україна; **Бушер В. В.**, д-р техн. наук, проф., Одеський національного політехнічного університету, м. Одеса, Україна; **Андрієнко П. Д.**, д-р техн. наук, проф., 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.

*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.

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: rrvv@zntu.edu.ua.  
Електронна адреса журналу <http://ee.zntu.edu.ua> E-mail: etae@ukr.net

Комп'ютерна верстка Дяченко О.О. Редактор англійських текстів Войтенко С.В. Журнал підписано до друку 09.03.2021 за рекомендацією вченої ради національного університету "Запорізька політехніка" (протокол №8/21 від 01.03.2021 р.). Формат 60x84/8. Ум. Др. Арк. 8,49. Тираж 300 прим. Зам. №149.

ZAPORIZHZHIA POLYTECHNIC NATIONAL UNIVERSITY

---



*Scientific journal*

# **ELECTRICAL ENGINEERING & POWER ENGINEERING**

**№1'2021**

*Founded by Zaporizhzhia Polytechnic National University in May 1999*

*4 issues per year*

Zaporizhzhia

2021

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

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

FOREIGN MEMBERS OF EDITORIAL BOARD

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

MEMBERS OF EDITORIAL BOARD (Ukraine)

**M.V. Zagirnyak**, Sc.D., prof., Kremenchuk Michaylo Ostrogradskiy National University; **S. E Zirka**, Sc.D., prof., Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro, Ukraine; **V. I. Milykh**, Sc.D., prof., National Technical University "KhPI", Kharkiv, Ukraine; **A. V. Zhylytsov**, Sc.D., prof., National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine; **Ya. S. Paranchuk**, Sc.D., prof., Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine; **O. I. Tolochko**, Sc.D. prof., Kyiv Polytechnic National Technical University, Kiev, Ukraine; **V. V. Busher**, Sc.D., prof., Odesa National Polytechnic University, Odesa, Ukraine; **P. D. Andrienko**, Sc.D., prof., Zaporizhzhia 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;

*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.

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

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

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

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

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

Computer layout Dyachenko O.O. Editor of English texts Voitenko S.V. The journal was signed on March 09, 2021 on the recommendation of the academic council of the Zaporizhzhia Polytechnic National University (Protocol No. 8/21 dated march 01, 2021). Sheet size 60x84/8. Cond. Print. Sheets 8,49. Number of copies printed 300. Rep. №149.

# ЗМІСТ

## I ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

*Зірка С.Є., Мороз Ю.І., Артурі Ц.М.*

Ще раз про неподільність індуктивності розсіювання трансформатору.....8

*Коцур І.М., Гуразда А.В., Доля Б.О., Шестов Л.Є.*

Енергоефективний електропривід вентиляційних установок.....18

## II ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА

*Сподоба М.О., Заблудський М.М.*

Залежність енергетичних витрат від типу використаної механічної мішалки у біогазовому реакторі.....26

*Папайка Ю.А., Лисенко О.Г., Бубликов А.В., Олішевський І.Г.*

Проблеми електромагнітної сумісності потужних енергооб'єднань при масовому приєднанні відновлювальних джерел енергії.....34

*Коцур М.І., Яримбаи Д.С., Безверхня Ю.С., Дівчук Т.Ю.*

Особливості польового моделювання електромагнітних процесів тролейного шинопровода.....46

## III АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ

*Фурманова Н.І., Фарафонов О.Ю., Малий О.Ю., Піроженко О.О.*

Підходи для підвищення точності вимірювання температури тіла людини безконтактними ІЧ термометрами.....61

# CONTENTS

## I ELECTRICAL ENGINEERING

*Zirka S.E., Moroz Y.I., Arturi C.M.*  
Once again about the indivisibility of the scattered inductance of the transformer.....8

*Kotsur I.M., Hurazda A.V., Dolia B.A., Shestov L.E.*  
A energy efficient electric drive of air units.....18

## II POWER ENGINEERING

*Spodoba M.O., Zablodskiy N.N.*  
Dependence of energy consumptions on the type of mechanical mixer used  
in the biogas  
reactor.....26

*Papaika Yu. A., Lysenko O. H., Bublikov A.V., Olishevskiy I. H.*  
Problems of electromagnetic compatibility of powerful energy associations during  
mass connection of renewable energy sources.....34

*Kotsur M.I., Yarymbash D.S., Bezverkhnya Yu.S., Divchuk T.Yu.*  
Features of field modeling of electromagnetic processes of trolley busbar.....46

## III AUTOMATION AND COMPUTER INTEGRATED TECHNOLOGIES

*Furmanova N.I., Farafonov O.Yu., Malij O.Yu., Pirozhenko O.O.*  
Approaches to improve the accuracy of measurement of human body temperature by  
contactless IR thermometers.....61

# СОДЕРЖАНИЕ

## I ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

*Зирка С.Е., Мороз Ю.И., Артури Ц.М.*

Еще раз о неделимости индуктивности рассеяния трансформатора.....8

*Коцур И. М., Гуразда А.В., Доля Б.А., Шестов Л.Е.*

Энергоэффективный электропривод вентиляторных установок.....18

## II ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

*Сподоба М.А., Заблудский Н.Н.*

Зависимость энергетических затрат от типа использованной механической мешалки в биогазовом реакторе.....26

*Папаика Ю.А., Лысенко А. Г., Бубликов А.В., Олишевский И.Г.*

Проблемы электромагнитной совместимости мощных энергообъединений при массовом подключении возобновляемых источников энергии.....34

*Коцур М.И., Ярымбаиш Д.С., Безверхняя Ю.С., Дивчук Т.Ю.*

Особенности полевого моделирования электромагнитных процессов троллейных шинопроводов.....46

## III АВТОМАТИЗАЦИЯ И КОМПЬЮТЕРНО-ИНТЕГРИРОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

*Фурманова Н.И., Фарафонов А.Ю., Малый А.Ю., Пироженко А.А.*

Подходы к повышению точности измерения температуры тела человека бесконтактными ИК термометрами.....61

## ЕЩЕ РАЗ О НЕДЕЛИМОСТИ ИНДУКТИВНОСТИ РАССЕЙНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА

- ЗИРКА С.Е.** д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры систем автоматизированного управления (САУ) Днепровского национального университета, Днепр, Украина, e-mail: zirka@email.dp.ua;
- МОРОЗ Ю.И.** канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры САУ Днепровского национального университета, Днепр, Украина, e-mail: yuriy\_moroz@i.ua;
- АРТУРИ Ц.М.** профессор кафедры электроники, информации и биоинженерии Миланского политехнического института, Милан, Италия, e-mail: cesaremario.arturi@polimi.it;

**Цель работы.** Показать неадекватность традиционной Т-образной схемы замещения трансформатора в режимах с насыщением магнитопровода. Указать на необоснованность разделения индуктивности рассеяния трансформатора на компоненты. Объяснить необходимость применения П-образной схемы замещения и ее структуру в случае трансформатора с двумя и тремя обмотками конечной радиальной толщины.

**Методы исследования.** Анализ магнитных полей в окне трансформатора и моделирование переходных процессов в схемах замещения трансформатора посредством препроцессора ATPDraw программы ATP.

**Полученные результаты.** Показана необоснованность широко известной Т-образной схемы замещения трансформатора. Отмечены отличия процессов в стержнях и ядрах трансформатора при его включении на сеть и при коротких замыканиях обмоток. Предложены схемы замещения трансформатора с двумя и тремя обмотками конечной толщины, воспроизводящие эти отличия.

**Научная новизна.** Констатируется отсутствие физического смысла в разделении индуктивности рассеяния трансформатора на компоненты. Показаны преимущества П-образной схемы замещения при расчете бросков тока намагничивания, сопровождающих включение трансформатора со стороны внутренней и внешней обмоток.

**Практическая ценность.** Отмечена теоретическая несостоятельность и практическая непригодность Т-образной схемы замещения для расчета режимов, сопровождаемых насыщением магнитопровода. Показаны преимущества Т-образной схемы замещения.

**Ключевые слова:** трансформатор; схемы замещения; индуктивности рассеяния; токи включения.

### I. ВВЕДЕНИЕ

Моделирование цепей, содержащих трансформаторы, производится с использованием их схем замещения (СЗ). Для режимов, без насыщения магнитопровода (МП) трансформатора, структура и параметры различных СЗ обычно не вызывают вопросов, а применение Т-, Г- или П-образных СЗ дает идентичные результаты. Дискуссии по поводу СЗ возникают при анализе режимов, при которых отдельные участки магнитопровода достигают насыщения. Отличие процессов в стержнях и ядрах потребовало переосмысления таких привычных, но бессмысленных в своей сущности понятий как индуктивности рассеяния отдельных обмоток [1], [2], что потребовало пересмотра привычной Т-образной СЗ [3], [4], [5]. Настоящая статья напоминает об отсутствии физического смысла у Т-образной СЗ и объясняет преимущества П-образной схемы замещения трансформатора с концентрическими обмотками.

### II. АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Несмотря на давнюю историю вопроса [1], [2] и, в частности, нескольких обстоятельных дискуссий в

журнале "Электричество" (см. [6], [7] и статьи в № 9 за 1983 г.), *неправомерное* понятие об "индивидуальных" индуктивностях рассеяния обмоток трансформатора широко используется в отечественных и зарубежных публикациях. К сожалению, авторы многих публикуемых статей с историей вопроса не знакомы, а о потенциальных ошибках, вызванных применением неадекватных СЗ трансформатора, не задумываются.

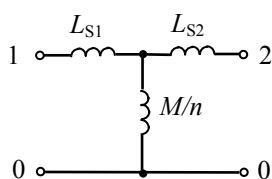
### III. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью настоящей статьи является простое объяснение структуры схем замещения трансформатора с концентрическими обмотками, которые охватывают режимы с глубоким насыщением магнитопровода. Показан метод учета толщины обмоток в моделях двух- и трехобмоточных трансформаторов с концентрическими обмотками.

### IV. Т-ОБРАЗНАЯ СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА И ЕЕ НЕДОСТАТКИ

Наиболее известной схемой замещения однофазного двухобмоточного трансформатора с концентрическими обмотками является Т-образная цепь (схема Штейнмеца), показанная на рис. 1.

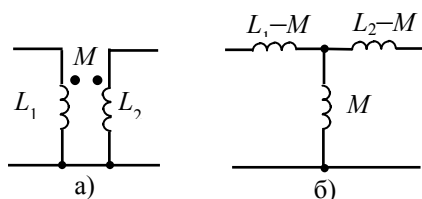




**Рисунок 1.** Традиционная (Т-образная) схема замещения трансформатора с двумя обмотками

Для использования сопоставимых величин параметры схемы приведены к числу витков  $w_1$  внутренней обмотки. При  $w_2$  витках в наружной обмотке и коэффициенте трансформации  $n = w_2/w_1$  продольные индуктивности  $L_{S1}$  и  $L_{S2}$  схемы определяются соотношениями  $L_{S1} = L_1 - M/n$  и  $L_{S2} = L_2/n^2 - M/n$ . Для краткости и в связи с их незначительным влиянием в мощных трансформаторах, активные сопротивления обмоток  $r_1$  и  $r_2/n^2$  на схеме не показаны.

Очевидно, что схема на рис. 1 восходит к *линейной* цепи на рис. 2а, катушки которой характеризуются собственными индуктивностями  $L_1$ ,  $L_2$  и взаимной индуктивностью  $M$ . После "развязывания" магнитно-связанных цепей на рис. 2а [8, с. 127], схема замещения *линейного* трансформатора приобретает вид Т-образной структуры, показанной на рис. 2б.



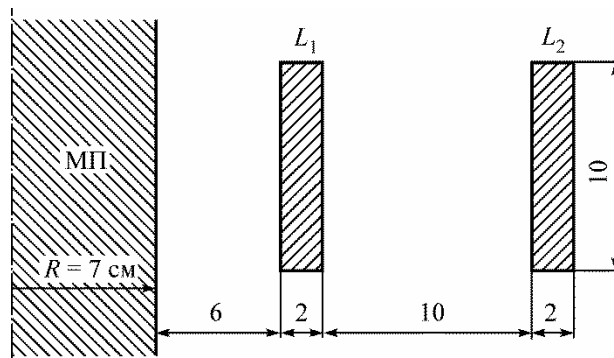
**Рисунок 2.** а) Магнитно-связанные катушки; б) схема замещения, полученная путем "развязывания"

Неправомерность объяснения структуры нелинейной СЗ на рис. 1 в терминах, относящихся к линейным цепям на рис. 2, состоит в неприменимости принципа суперпозиции к нелинейным магнитным цепям. Это делает невозможным измерение и раздельный расчет индуктивностей  $L_{S1}$  и  $L_{S2}$  [1], [2].

Кроме того, схема с одной индуктивностью намагничивания, например цепь на рис. 1, не позволяет воспроизвести различную степень насыщения стержней и ярм при коротком замыкании наружной и внутренней обмоток, а также отличие бросков тока намагничивания (имеются в виду их приведенные значения) при подключении трансформатора со стороны этих обмоток.

Несмотря на сказанное, все же рассчитаем величины  $L_{S1}$  и  $L_{S2}$  для двух *коаксиальных* катушек, находящихся на воздухе ( $\mu=1$ ), а затем проследим изменение этих индуктивностей и их суммы,  $L_S = L_{S1} + L_{S2}$ , для случаев, когда катушки надеваются на цилиндрический магнитопровод с относительной магнитной проницаемостью  $\mu$ . Для упрощения, рассмотрим *одновитковые* катушки, показанные на рис. 3. В допол-

нение к размерам катушек, взятым из [9, с. 377], считаем, что радиус  $R$  вносимого непроводящего МП равен 7 см.



**Рисунок 3.** К расчету "индуктивностей рассеяния" обмоток в присутствии магнитопровода (МП) с заданной магнитной проницаемостью

При  $\mu=1$ , то есть при отсутствии МП, индуктивности  $L_1$ ,  $L_2$  и  $M$  могут быть рассчитаны по алгоритму [10]. При  $\mu > 1$  может быть использован метод, описанный в [11]. Результаты расчетов по [10] и [11] представлены в таблице 1. Соответствующие значения  $L_{S1} = L_1 - M$ ,  $L_{S2} = L_2 - M$  и  $L_S = L_{S1} + L_{S2}$  сведены в таблицу 2.

**Таблица 1.** Индуктивности обмоток (мкГн)

$\mu$	$L_1$	$L_2$	$M$
1	0.312	0.773	0.160
10	1.048	1.415	0.835
100	6.262	6.491	5.970
1000	52.201	52.349	51.866
10000	491.355	491.466	491.001

**Таблица 2.** Индуктивности рассеяния (мкГн)

$\mu$	$L_{S1}$	$L_{S2}$	$L_S$
1	0.152	0.613	0.765
10	0.212	0.579	0.791
100	0.292	0.521	0.813
1000	0.335	0.484	0.819
10000	0.354	0.466	0.820

Как следует из таблицы 2, с ростом  $\mu$  индуктивность рассеяния обмоток  $L_S$  немного возрастет (примерно на 7%), а расчетное значение  $L_{S1}$  увеличивается за счет уменьшения  $L_{S2}$ .

Представленный (физически бессмысленный) расчет иллюстрирует заключение [1] о невозможности "полной согласованности между различными методами (оценки  $L_{S1}$  и  $L_{S2}$ ) из-за различной проницаемости сердечника при различных плотностях магнитного потока. Различные плотности потока (различная проницаемость) весьма ощутимо влияют на разделение реактивного сопротивления, даже если они не могут существенно повлиять на общее реактивное сопротивление".

В условиях отсутствия физически обоснованного метода определения  $L_{S1}$  и  $L_{S2}$  чаще всего используется распространенное эмпирическое правило (rule of thumb), согласно которому индуктивность  $L_S$  распределяется между  $L_{S1}$  и  $L_{S2}$  поровну. Как будет показано ниже, шагом к исправлению этого "правила" стало уточнение, согласно которому "большая часть полного сопротивления рассеяния, 75% - 90%, должна быть размещена на стороне внешней обмотки" [12].

Как будет показано ниже, упомянутую долю следует увеличить до 100%, то есть всю индуктивность  $L_S$  следует размещать на стороне внешней обмотки. При этом отпадает вопрос о разделении  $L_S$  на компоненты и появляется обоснованная возможность введения ветви намагничивания, представляющей ярмо магнитопровода.

**V. П-ОБРАЗНАЯ СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА**

Для объяснения структуры СЗ, охватывающей режимы с насыщением участков МП, рассмотрим методику оценки токов включения трансформатора. Постоянный интерес к этой теме в литературе объясняется тем обстоятельством, что пиковые значения токов включения мощного трансформатора могут в сотни раз превышать токи холостого хода в номинальном режиме [13].

При включении трансформатора на сеть или подключении к генератору, стержень МП может достигать очень глубокого насыщения. При этом индукция в стержне и прилегающем воздушном пространстве может достигать значений порядка 3 Тл и выше. Причиной является тот факт, что стержень находится в "трубке", ограниченной обмоткой намагничивания. Безотносительно к степени насыщения стержня, никакая часть его потока за пределы трубки не выходит. Насыщение же ярм (они включают боковые ветви МП) остается умеренным в том смысле, что индукция в ярмах не превышает обычно 2 Тл. Это объясняется тем, что по мере насыщения ярм магнитная проницаемость их материала приближается к проницаемости вакуума ( $\mu_0$ ), вследствие чего возникают шунтирующие магнитные потоки (потоки  $\Phi'_0$  и  $\Phi''_0$  на рис. 4а), воздушные пути которых имеют меньшую длину, чем длина насыщающихся ярм. Таким образом, шунтирующие потоки  $\Phi_0$  разгружают ярма от дальнейшего насыщения.

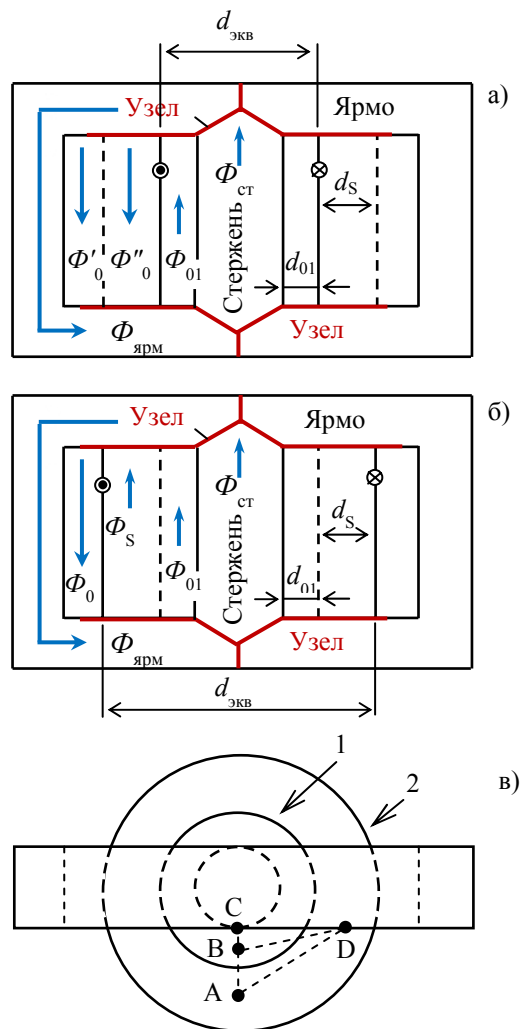
Описанные особенности насыщения МП лежат в основе аналитических оценок бросков тока включения [13], [14], [15]. При выводе соответствующих аналитических выражений считается, что индуктивность трансформатора с ненасыщенным МП бесконечно велика, а в момент насыщения стержня ее значение уменьшается до значения:

$$L_{нас} = \frac{\mu_0 w^2}{h} \times \frac{\pi d_{эКВ}^2}{4} \tag{1}$$

Здесь  $w$  и  $h$  – число витков и высота возбуждаемой обмотки, а ее эквивалентный диаметр  $d_{эКВ}$  определяется диаметром среднего витка [15] или находится как  $d_{эКВ} = d_{вн} + 2b/3$  [13], где  $d_{вн}$  – внутренний диаметр обмотки, а  $b$  – ее толщина.

Хотя значения  $h$  и  $d_{эКВ}$ , рекомендуемые в разных источниках, могут несколько отличаться, общим для них является то, что (1) не учитывает присутствия ярм. Это означает, что (1) относится к обмотке, охватывающей полностью насыщенный стержень, находящийся между двумя ненасыщенными ярмами [4], [13].

**Подключение трансформатора со стороны внутренней обмотки 1.** При ненагруженной наружной обмотке 2 (ее пунктирное изображение на рис. 4а подчеркивает отсутствие влияния этой обмотки), эквивалентным диаметром  $d_{эКВ}$  является диаметр тонкой внутренней обмотки.



**Рисунок 4.** Магнитная цепь с двумя тонкими concentрическими обмотками

При насыщении стержня обмотка с диаметром  $d_{эКВ}$  охватывает также канал 0-1 между внутренней

обмоткой и стержнем. Наличие канала 0-1 определяется необходимостью обеспечить надлежащую изоляцию между обмоткой 1 и стальной заземленной стержня, а ширина расчетного канала  $d_{01}$  учитывает объем всего немагнитного материала, охваченного внутренней обмоткой. Этот объем определяется, в частности, тем, что сечение стержня представляет собой ступенчатую фигуру, площадь которой меньше площади, описывающей его окружности. Кроме того, стержень шихтуется из листов стали с коэффициентом заполнения, не превышающим 0.95-0.97. Таким образом, индуктивность  $L_{нас}$ , определяемая (1), образуется индуктивностью насыщенного стержня  $L_{ст}$  и индуктивностью  $L_{01}$ , характеризующей канал 0-1.

Важно заметить, что ширина канала рассеяния  $d_s$ , и, следовательно, индуктивность  $L_s$  в рассмотрении процессов не участвуют и на бросок тока не влияют. Если же расчет тока включения производится по схеме на рис. 1, то контур тока со стороны зажимов 1 - 0 внутренней обмотки будет включать излишнюю индуктивность  $L_{s1}$  и расчетное значение тока окажется заниженным.

Обсуждая положение узлов магнитной цепи, следует обратить внимание, что в отличие от плоской структуры МП, где продольные оси стержней и ярм лежат в одной плоскости, потоки  $\Phi_{01}$ ,  $\Phi_s$  и  $\Phi_0$  текут в цилиндрических трубках и точками их соединения (узлами магнитной цепи) логично считать точки, находящиеся на оси стержня. Известной альтернативой является размещение верхнего и нижнего узлов около середины соответствующих ярм (напротив оси канала рассеяния) [16]. Очевидно, что такое размещение узлов было сделано на основании фронтальной проекции МП, не учитывающей *пространственный* характер потоков  $\Phi_{01}$ ,  $\Phi_s$  и  $\Phi_0$ . Как можно видеть из рис. 4в, кратчайшими путями замыкания вертикальных потоков, выходящих из точек А и В, являются отрезки АС и ВС, но не отрезки АД и ВД, ведущие к середине ярма.

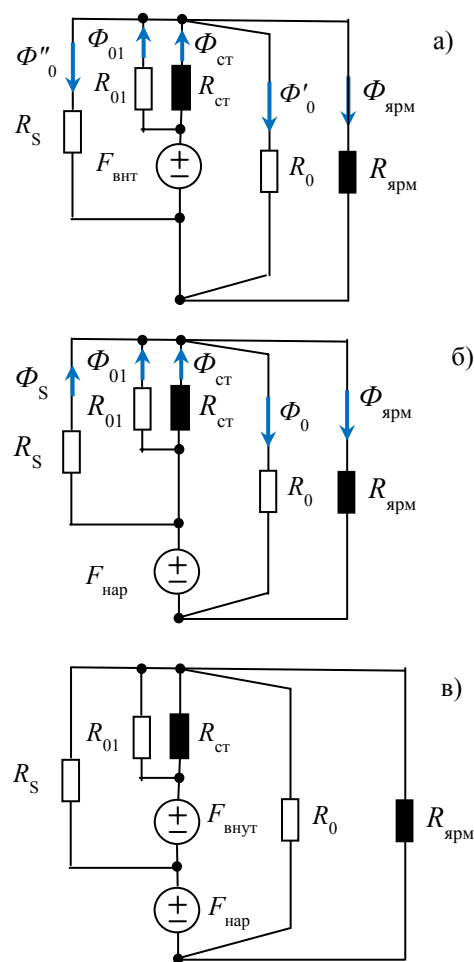
В принципе, ярма МП можно разбить на участки и ввести на них соответствующее число дополнительных узлов. Примером такой схемы является многоэлементная модель (МЭМ) трансформатора, рассмотренная в [17]. Однако анализ, проведенный в [17], не выявил существенных преимуществ МЭМ перед схемой с двумя узлами.

**Подключение трансформатора со стороны наружной обмотки 1 (рис. 4б).** При ненагруженной внутренней обмотке окружность с диаметром  $d_{эКВ}$  охватывает также и канал рассеяния  $d_s$ . Таким образом, индуктивность  $L_{нас}$  определяется суммой  $L_{ст} + L_{01} + L_s$ . Поэтому, в отличие от модели на рис. 1, индуктивность  $L_s$  должна быть *полностью* отнесена к наружной обмотке.

**Магнитная и электрическая схемы замещения трансформатора.** Рассмотренные выше пути магнитных потоков удобно представить с использо-

ванием магнитных цепей трансформатора, показанных на рис. 5.

Элементы с заливкой представляют гистерезисные магнитные сопротивления стержня ( $R_{ст}$ ) и ярма ( $R_{ярм}$ ), а элементы без заливки обозначают *линейные* магнитные сопротивления путей потоков в воздухе (индексы у  $R_{01}$ ,  $R_s$  и  $R_0$  совпадают с индексами соответствующих магнитных потоков). Случаю возбуждения внутренней и внешней обмоток, представленным на рис. 4а и 4б, соответствуют магнитные схемы замещения, показанные на рис. 5а и 5б, где  $F_{внут}$  и  $F_{нар}$  – магнитодвижущие силы (МДС) обмоток. Очевидно, что *результатирующая* схема замещения магнитной цепи трансформатора (схема с двумя МДС) имеет вид, показанный на рис. 5в [18].



**Рисунок 5.** Магнитные схемы замещения двухобмоточного трансформатора при питании а) внутренней, б) наружной, в) внутренней и наружной обмоток

Чтобы объединить магнитную модель трансформатора с электрическими компонентами внешней цепи, схема на рис. 5в преобразуется в ее электрический эквивалент. Это делается с использованием принципа дуальности [19], согласно которому параллельное

соединение магнитных компонент конвертируется в последовательное соединение их электрических аналогов, магнитные сопротивления становятся индуктивностями, а источники МДС заменяются, говоря формально, источниками тока [19]. Относительно узлов и контуров сохраняются правила дуальных преобразований, известные из теории электрических цепей [8, с. 132]. Применяя эти правила к магнитной цепи на рис. 5в, приходим к ее электрическому эквиваленту, включенному между идеальными трансформаторами ИТ<sub>1</sub> и ИТ<sub>2</sub> на рис. 6. Упомянутые выше источники тока эквивалентируются источниками напряжений  $U_{\text{внут}}$  и  $U_{\text{нар}}$  и активными сопротивлениями обмоток  $r_1$  и  $r_2$ . Единичный коэффициент трансформации у ИТ<sub>1</sub> указывает на то, что параметры СЗ приведены к виткам внутренней обмотки.

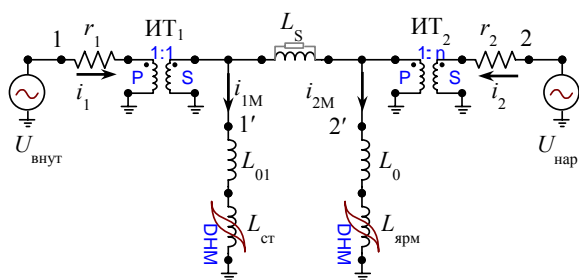


Рисунок 6. П-образная СЗ трансформатора

Схема замещения на рис. 6 построена с использованием графического препроцессора ATPDraw для программы АТР [20]. Стержень и ярмо трансформатора представлены на схеме элементами ДНМ (Dynamic Hysteresis Model), реализующими, начиная с 2020 года, динамическую модель гистерезиса (ДМГ). Принцип ДМГ описан в [21] и [22], а метод ее реализации в программе АТР объясняется в [23] и [24]. Особенностью ДМГ является наличие у каждого материала из ее библиотеки кривой намагничивания, достигающей глубокого насыщения [18, Fig.4]. Конечный сегмент такой статической кривой (он находится, обычно, на уровне 1.96-2.06 Тл) имеет наклон  $\mu_0$ . Такое устройство ДМГ-индукторов обуславливает наличие в модели линейных индуктивностей  $L_{01}$  и  $L_0$ , которые в других П-моделях могут включаться в состав ветвей намагничивания, то есть объединяться с нелинейными индуктивностями  $L_{\text{ст}}$  и  $L_{\text{ярем}}$ , представляющими процессы в стали. Значения индуктивностей  $L_{01}$  и  $L_0$  могут быть выбраны так, чтобы обеспечить обратимость модели [18], то есть ее способность воспроизводить измеренные броски токов, при включении трансформатора со стороны внутренней и внешней обмоток. Заметим, что индуктивность  $L_{01}$  характеризует сравнительно "тесный" [5] пристержневой канал 0-1, в то время как "канал" с внеобмоточным потоком  $\Phi_0$  не имеет четко выраженных физических границ, характеризуется значительно большим сечением и, следовательно, большей индуктивностью  $L_0$ . Например, у 222 МВА однофазного трансформа-

тора, рассмотренного в [18], значение  $L_0$  (17.287 мГн) в 63 раз больше, чем  $L_{01}$  (0.272 мГн), что делает ветвь намагничивания наружной обмотки *маломощной* [4].

То обстоятельство, что  $L_0 \gg L_{01}$  обуславливает большую крутизну вебер-амперной характеристики (ВАХ) ветви намагничивания наружной обмотки (обычно обмотки высшего напряжения, ВН) по сравнению с наклоном ВАХ внутренней обмотки (обмотки низшего напряжения, НН) [4], [5]. Подобное соотношение наклонов ВАХ имеет место не только для отдельно взятых ветвей, но и для ВАХ трансформатора в целом, рассчитанных со стороны наружной и внутренней обмоток. Сказанное иллюстрируется кривыми на рис. 7, рассчитанными для трансформатора в [18].

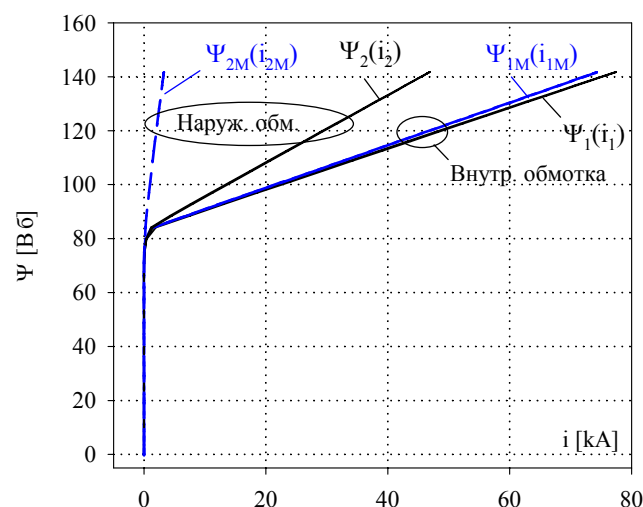


Рисунок 7. ВАХ ветвей намагничивания и трансформатора в целом

Пунктирные зависимости  $\Psi_{1M}(i_{1M})$  и  $\Psi_{2M}(i_{2M})$  являются ВАХ внутренней и наружной ветви намагничивания, соответственно. Сплошные кривые  $\Psi_1(i_1)$  и  $\Psi_2(i_2)$  представляют собой ВАХ, рассчитанные со стороны зажимов НН и ВН трансформатора. ВАХ  $\Psi_{1M}(i_{1M})$  и  $\Psi_1(i_1)$  рассчитаны при подключении к генератору *внутренней* обмотки (наружная обмотка считалась при этом разомкнутой). Кривые  $\Psi_{2M}(i_{2M})$  и  $\Psi_2(i_2)$  рассчитаны для случая, когда к тому же генератору подключается *наружная* обмотка, а внутренняя обмотка трансформатора разомкнута. Идеальный трансформатор ИТ<sub>2</sub> в этом режиме заменяется трансформатором ИТ<sub>1</sub>, а для получения наибольших бросков тока напряжение генератора в момент коммутации переходит через ноль. Потокосцепления находятся интегрированием потенциалов в точках 1 и 2 (для потокосцеплений  $\Psi_1$  и  $\Psi_2$ ) или потенциалов в точках 1' и 2' (для потокосцеплений  $\Psi_{1M}$  и  $\Psi_{2M}$ ).

## VI. СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ПРИ УЧЕТЕ ТОЛЩИНЫ ОМОТК

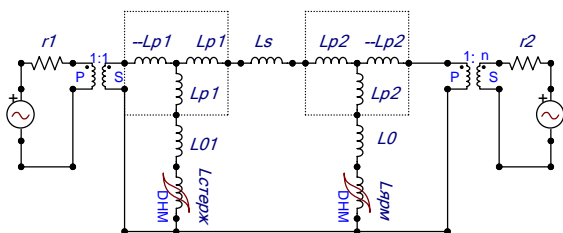
В первом приближении схема замещения на рис. 6 применима и к трансформатору с обмотками конечной радиальной толщины. При необходимости более

детального моделирования процессов в стержнях и ярмах МП, схему можно дополнить тройками индуктивностей  $L_{p1}$  и  $L_{p2}$ , показанными на рис. 8.

При приведении параметров схемы к числу витков  $w_1$  внутренней обмотки значения  $L_{p1}$  и  $L_{p2}$  найдутся как:

$$L_{p1(2)} = \frac{\mu_0 w_1^2}{h} p_{1(2)} \frac{b_{1(2)}}{6}, \quad (2)$$

где  $b_{1(2)}$  – толщина, а  $p_{1(2)}$  – периметр внутренней (внешней) обмотки.



**Рисунок 8.** СЗ трансформатора при учете толщины обмоток

Использование индуктивностей  $L_{p1}$  на стороне внутренней обмотки и аналогичных индуктивностей у зажимов остальных обмоток многообмоточного трансформатора было описано в [25]. Одновременно, в 2016 году, но в других обозначениях, индуктивности типа  $L_{p1}$  были использованы в [26, рис. 2]. Заметим, что такой метод учета толщины обмоток был описан в [3], а еще ранее – в статьях [27] и [28], на которые авторы [3] и [26] не ссылаются.

При введении индуктивностей  $L_{p1}$  и  $L_{p2}$ , то есть при использовании СЗ на рис. 8, ее индуктивности  $L_{01}$  и  $L_0$  должны быть пересчитаны [29]. Это ведет к изменению наклонов ВАХ ветвей намагничивания, однако ВАХ трансформатора и броски токов включения на стороне обеих обмоток остаются неизменными.

**Схема замещения трехобмоточного трансформатора.** Как показано в [29], упомянутые индуктивности  $L_p$  можно обнаружить и в широко известной трехлучевой СЗ трехобмоточного трансформатора. Индуктивности  $L_1, L_2$  и  $L_3$  лучей такой схемы выражаются через попарные индуктивности рассеяния обмоток, то есть  $L_{S12}, L_{S23}$  и  $L_{S13}$ . Например, индуктивность ветви, соединяющей центральную точку схемы и зажим 2 средней обмотки, находится как:

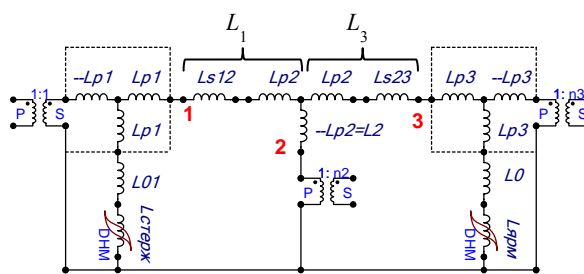
$$L_2 = \frac{L_{S12} + L_{S23} - L_{S13}}{2}. \quad (3)$$

Известно, что индуктивность рассеяния  $L_{S13}$  между внутренней обмоткой 1 и внешней обмоткой 3 трансформатора с концентрическими обмотками всегда превышает сумму индуктивностей рассеяния  $L_{S12}$  и  $L_{S23}$  между смежными обмотками. Вследствие этого, величина  $L_2$ , рассчитанная по (3), – является отрицательной. Вслед за [30], в ряде работ объясняется, что неравенство  $L_{S13} > L_{S12} + L_{S23}$  обусловлено конечной толщиной  $b_2$  средней обмотки 2. Как показано в [29],

трехлучевая звезда в целом может быть представлена индуктивностями, включенными между зажимами 1, 2 и 3 на схеме рис. 9, которая и является схемой замещения трехобмоточного трансформатора.

Подставляя в (3), известные выражения для индуктивностей рассеяния [29], находим, что:

$$L_2 = -L_{p2} = -\frac{\mu_0 w_1^2}{h} p_2 \frac{b_2}{6}. \quad (4)$$



**Рисунок 9.** СЗ трехобмоточного трансформатора

Как и в модели двухобмоточного трансформатора, ветвь намагничивания стержня включается со стороны внутренней обмотки, а маломощная ветвь, представляющая ярмо, – со стороны наружной обмотки. Учет толщины обмоток в модели трехфазного трансформатора показан в [29].

### VII. ВЫВОДЫ

При сравнении Т- и П-образных СЗ следует оговорить режим работы трансформатора. Как отмечено в разделе 1, в режимах с ненасыщенным МП применение этих схем дает идентичные результаты. При насыщении МП прямое сравнение Т- и П-образных СЗ становится затруднительным, так как единственная ветвь намагничивания Т-образной СЗ не может отразить тот факт, что стержень (длиной  $l_1$  и напряженностью магнитного поля  $H_1$ ) и ярмо (с длиной  $l_2$  и напряженностью  $H_2$ ) насыщаются по-разному. Экспериментальное исследование процессов подключения ненагруженного трансформатора к сети показало, что "основная часть намагничивающей силы приходится на стержень" [4]. В расчете, проведенном в [31], максимальные падения магнитных напряжений в стержне ( $H_1 l_1$ ) и ярме ( $H_2 l_2$ ) составили, соответственно, 88% и 12% МДС обмотки ВН. Неразрешаемым вопросом для Т-образной СЗ является неопределенность в выборе расчетной длины магнитопровода. Вторым неясным фактором Т-образной СЗ является разделение индуктивностей  $L_s$  на составляющие (индуктивности  $L_{S1}$  и  $L_{S2}$  в схеме рис. 1). Обойти эти неопределенности и получить правильные броски тока для конкретного случая удается путем подбора наклона конечного участка кривой насыщения и положения ее "колена". Очевидно, что отличие кривых насыщения (кривых  $\Psi_2(i_2)$  и  $\Psi_1(i_1)$  на рис. 7), измеренных или рассчитанных со стороны различных обмоток, не позволяет считать такое решение универсальным, поскольку схема замещения трансформатора является элементом

цепи в целом и должна быть пригодной для моделирования любых режимов ее работы.

Распространение принципа обратимости на модель трехфазного пятистержневого трансформатора описано в [32], где глубокое поочередное насыщение стержней и ярм обусловлено геомагнитно индуцированными токами.

Введение в схему замещения индуктивностей  $L_{p1}$  и  $L_{p2}$  (с отрицательными индуктивностями у зажимов) позволяет воспроизвести характерные изменения индукции в стержне и ярме МП, наблюдаемые при коротком замыкании (КЗ) внутренней или внешней обмоток. Как указано в [33, с. 22, 92-94], при питании внутренней обмотки и замыкании внешней – индукция в стержне увеличивается до 105-115% от ее номинального значения в режиме холостого хода. При этом индукция в ярме падает до 5-10% от номинальной и сопровождается "опрокидыванием" фазы ("антипоток" по терминологии [26]). При питании внешней обмотки и замыкании внутренней процессы в стержне и ярме меняются местами. Более подробно, процессы при КЗ обмоток рассмотрены в [29].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Boyajian A. Resolution of transformer reactances into primary and secondary reactances / A. Boyajian // Transactions AIEE. – 1925. P. 805–810. DOI: 10.1109/JAIEE.1925.6535234.
- [2] Correggiari F. On the splitting of short-circuit reactance of transformers / F. Correggiari // L'Elettrotecnica. – 1954. – № 1. – P. 2-13 (in Italian).
- [3] Лейтес Л.В. Схемы замещения многообмоточных трансформаторов / Л.В. Лейтес, А.М. Пинцов. – М.: Энергия, 1974. – 192 с.
- [4] Зихерман М.Х. Характеристики намагничивания мощных трансформаторов / М.Х. Зихерман // Электричество. – 1972. – № 3. – С. 79-82.
- [5] Зихерман М.Х. О рассеянии в трансформаторах / М.Х. Зихерман // Энергоэксперт. – 2014. – № 6. – С. 30-33.
- [6] Марквардт Е.Г. Индуктивности рассеяния обмоток трансформатора / Е.Г. Марквардт // Электричество. – 1936. – № 23. – С. 26-31.
- [7] Петров Г.Н. Об индуктивностях рассеяния обмоток трансформатора / Г.Н. Петров // Электричество. – 1936, № 23. – С. 31-32.
- [8] Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи / Л.А. Бессонов. – М.: Высшая школа, 1996. – 638 с.
- [9] Калантаров П.Л. Расчет индуктивностей. Справочная книга / П.Л. Калантаров, Л.А. Цейтлин. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 488 с.
- [10] Fawzi T. H. The accurate computation of self and mutual inductances of circular coils / T.H. Fawzi, P.E. Burke // IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. – 1978. – Vol. 97, № 2, – P. 464–468. DOI: 10.1109/TPAS.1978.354506.
- [11] Бунин А.Г. Расчет импульсных перенапряжений в обмотках трансформаторов с учетом влияния магнитопровода / А.Г. Бунин, Л. Н. Конторович // Электричество. – 1975. – № 7. – С. 50-54.
- [12] Martinez-Velasco J.A. Transformer modeling for low frequency transients – The state of the art / J.A. Martinez-Velasco, B.A. Mork // Int. Conf. Power Systems Transients – IPST 2003 in New Orleans, USA.
- [13] Лурье А.И. Процесс включения трансформатора на холостой ход и короткое замыкание / А.И. Лурье // Электротехника. – 2008. – № 2. – С. 2-18.
- [14] Kulkarni S.V. Transformer Engineering: Design and Practice / S.V. Kulkarni, S.A. Khaparde. – New York: Marcel Dekker, – 2004. – 468 p.
- [15] Chiesa N. Transformer model for inrush current calculations: Simulations, measurements and sensitivity analysis / N. Chiesa, B.A. Mork, H.K. Høidalen // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2010. – Vol. 25. – № 4. – P. 2599–608. DOI: doi.org/10.1109/TPWRD.2010.2045518.
- [16] De Leon F. Comparing the T and  $\pi$  equivalent circuits for the calculation of transformer inrush currents / F. de Leon, A. Farazmand, P. Joseph // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2012. – Vol. 27. – № 4. – P. 2390-2398. DOI: 10.1109/TPWRD.2012.2208229.
- [17] Зирка С.Е. Топологические модели трансформатора / С.Е. Зирка, Ю.И. Мороз, Е.Ю. Мороз, А.Л. Тарчуткин // Электричество. – 2012. – № 10. – С. 33-42.
- [18] Zirka S.E. Topology-correct reversible transformer model / S.E. Zirka, Y.I. Moroz, C.M. Arturi, N. Chiesa, H.K. Høidalen // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2012. – Vol. 27. – № 4, P. 2037-2045. DOI: 10.1109/TPWRD.2012.2205275.
- [19] Cherry E.C. The duality between interlinked electric and magnetic circuits and the formation of transformer equivalent circuits / E.C. Cherry // Proceedings of the Physical Society. – 1949. – В 62. P. 101–111. DOI: 10.1088/0370-1301/62/2/303.
- [20] <https://www.emtp.org>.
- [21] Зирка С.Е. Инверсная модель магнитного гистерезиса / С.Е. Зирка, Ю.И. Мороз, Е.Ю. Мороз // Техническая электродинамика. – 2010. – № 4. – С. 3-7.
- [22] Zirka S.E. Inverse hysteresis models for transient simulation / S.E. Zirka, Y.I. Moroz, R.G. Harrison, N. Chiesa // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2014. – Vol. 29. – № 2. – P. 552-559. DOI: 10.1109/TPWRD.2013.2274530.
- [23] Zirka S.E. Implementation of inverse hysteresis model into EMTP — Part I: Static model / S.E. Zirka,

- Y.I. Moroz, N. Chiesa, R.G. Harrison, H.Kr. Høidalen // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2015. – Vol. 30, № 5. P. 2224-2232. DOI: 10.1109/TPWRD.2015.2416201.
- [24] Zirka S.E. Implementation of inverse hysteresis model into EMTP – Part II: Dynamic model / S.E. Zirka, Y.I. Moroz, N. Chiesa, R.G. Harrison, H. Kr. Høidalen // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2015. Vol. 30, № 5. – P. 2233–2241. DOI: doi.org/10.1109/TPWRD.2015.2416199.
- [25] Jazebi S. Duality derived transformer models for low-frequency electromagnetic transients—Part I: Topological models / S. Jazebi, S. E. Zirka, M. Lambert, A. Rezaei-Zare, N. Chiesa, Y. Moroz, X. Chen, M. Martinez-Duro, C. M. Arturi, E. P. Dick, A. Nangrang, R. A. Walling, J. Mahseredjian, J. A. Martinez, F. de León // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2016, Vol. 31. – № 5, P. 2410-2419. DOI: 10.1109/TPWRD.2016.2517327.
- [26] Shakirov M.A.  $2nT$ -shaped equivalent circuit of a transformer comprising  $n$  windings / M.A. Shakirov // St. Petersburg Poly. Univ. Journal Eng. Sci. Techn. 2016. – 3(249) – P. 49-63. DOI: 10.5862/JEST.246.6.
- [27] Arturi C.M. Model of a highly saturated three-phase autotransformer with tertiary winding and five-limb core and analysis of a time-varying short-circuit transient / C.M. Arturi // European Transactions on Electrical Power. – 1994. – Vol. 4. – № 6. – P. 513-524. DOI: https://doi.org/10.1002/etep.4450040620.
- [28] Edelmann H. Descriptive determination of transformer equivalent circuits. Arch. elektr. Ubemagung 1959; 13, 253–61. (in German).
- [29] Zhao J. Structure and properties of the hybrid and topological transformer models / J. Zhao, S.E. Zirka, Y.I. Moroz, C.M. Arturi // Int. Journal of Electr. Power & Energy Systems. – 2020. –Vol. 118, 105785. doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.105785.
- [30] Boyajian A. Theory of three-circuit transformers / A. Boyajian // J. AIEE – 1924. – Vol. 43: P. 345–355. https://doi.org/10.1109/JAIEE.1924.6535983.
- [31] Зирка С.Е. Моделирование переходных процессов в трансформаторе с учетом гистерезисных свойств магнитопровода / С.Е. Зирка, Ю.И. Мороз, Е.Ю. Мороз, А.Л. Гарчуткин // Техническая электродинамика. – 2010. – № 2 – С. 11-20.
- [32] Zirka S.E. Topological reversible model of three-phase five-limb transformer / S.E. Zirka, Y.I. Moroz, C.M. Arturi, J. Elovaara, M. Lahtinen. Electr Eng Power Eng. 2018; 3: С. 6–13.
- [33] Karsai K, Large power transformers / K. Karsai, D. Kerényi, L. Kiss.— New York: Elsevier; 1987, 614 p.

Стаття надійшла до редакції 15.02.2021

## ЩЕ РАЗ ПРО НЕПОДІЛЬНІСТЬ ІНДУКТИВНОСТІ РОЗСІЮВАННЯ ТРАНСФОРМАТОРУ

ЗИРКА С.Є.

д-р техн. наук, професор, професор кафедри систем автоматизованого управління (САУ) Дніпровського національного університету, Дніпро, Україна, e-mail: zirka@email.dp.ua;

МОРОЗ Ю.І.

канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри САУ Дніпровського національного університету, Дніпро, Україна, e-mail: yuriy\_moroz@i.ua;

АРТУРІ Ц.М.

професор кафедри електроніки, інформації та біоінженерії Міланського політехнічного інституту, Мілан, Італія, e-mail: cesaremario.arturi@polimi.it;

**Мета роботи.** Показати неадекватність традиційної  $T$ -подібної заступної схеми трансформатора в режимах с насиченням його магнітопроводу. Вказати на необґрунтованість розподілу індуктивності розсіювання трансформатора на компоненти. Пояснити необхідність застосування  $\Pi$ -подібної заступної схеми у випадку трансформатора з двома і трьома обмотками скінченної радіальної товщини.

**Методи дослідження.** Аналіз магнітних полів у вікні трансформатора і моделювання перехідних процесів в заступних схемах трансформатора за допомогою препроцесора ATPDraw програми ATP.

**Отримані результати.** Показана необґрунтованість широко відомої  $T$ -подібної заступної схеми трансформатора. Відзначено відмінності процесів в стрижнях і ярах трансформатора при його включенні на мережу і при коротких замиканнях обмоток. Запропоновано заступні схеми трансформатора з двома і трьома обмотками кінцевої товщини, які відтворюють ці відмінності.

**Наукова новизна.** Констатовано відсутність фізичного сенсу в поділі індуктивності розсіювання трансформатора на компоненти. Показано переваги  $\Pi$ -подібної заступної схеми при розрахунку кидків струму на магнічування, які супроводжують включення трансформатора з боку внутрішньої і зовнішньої обмоток.

**Практична цінність.** Відзначено теоретична неспроможність і практична непридатність  $T$ -подібної заступної схеми для розрахунку режимів, що супроводжуються насичення магнітопроводу. Показано переваги  $T$ -подібної заступної схеми.

**Ключові слова:** трансформатор; заступні схеми; індуктивності розсіювання; токи включення.

## ONCE AGAIN ABOUT THE INDIVISIBILITY OF THE SCATTERED INDUCTANCE OF THE TRANSFORMER

ZIRKA S.E.	Professor of the Department of physics and technology of the Dnipro National University, Dnipro, Ukraine, e-mail: zirka@email.dp.ua;
MOROZ Y.I.	Ph.D., Associate professor of the Department of physics and technology of the Dnipro National University, Dnipro, Ukraine, e-mail: yuriy_moroz@i.ua;
ARTURI C.M.	Professor of the Department of electronics, information and bioengineering of the Politecnico di Milano, Milan, Italy, e-mail: cesaremario.arturi@polimi.it;

**Purpose.** The purpose of the article is to show the inadequacy of the traditional T-shaped equivalent circuit for modeling transformer operations with saturated core. The aim is to point out the unreasonableness of the separation of the transformer leakage inductance into components. The aim is also to explain the need to apply the  $\Pi$ -shaped transformer equivalent circuits to transformers with two and three windings with finite radial thickness.

**Methodology.** Analysis of magnetic fields in the transformer window and simulation of transient processes in equivalent circuits of the transformer using a preprocessor ATPDraw to the program ATP.

**Findings.** The unfoundedness of the well-known T-shaped transformer equivalent circuit is shown. Differences in the processes in the core legs and yokes when transformer is connected to the network and during short circuits of the windings are noted. Equivalent circuits of a transformer with two and three windings of finite thickness are proposed, reproducing these differences.

**Originality.** The absence of physical meaning in dividing the transformer leakage inductance into components is stated. The advantages of the  $\Pi$ -shaped equivalent circuit are shown when calculating inrush currents accompanying the transformer switching to the network on its inner and outer windings.

**Practical value.** We show theoretical insolvency and practical unsuitability of the T-shaped equivalent circuit for studying transformer operations accompanied by saturation of the magnetic circuit. Advantages of the  $\Pi$ -shaped equivalent circuit are clarified.

**Keywords:** transformer; equivalent circuits; leakage inductances; inrush currents

### REFERENCES

- [1] Boyajian, A. (1925). Resolution of transformer reactances into primary and secondary reactances, AIEE Transactions, 805–810. DOI: 10.1109/JAIEE.1925.6535234.
- [2] Correggiari, F. (1954) On the splitting of short-circuit reactance of transformers, L'Elettrotecnica, XLI, 1, P. 2–13 (in Italian).
- [3] Leites, L.V., Pintsov, A.M. (1974). Skhemy zameshcheniia mnogoobmotochnykh transformatorov. M. Energiia (in Russian).
- [4] Zikherman, M.Kh. (1972). Kharakteristiki namagnichivaniya moshchnykh transformatorov [Magnetization characteristics of large transformers], Elektrichestvo, 3, 79-82 (in Russian).
- [5] Zikherman, M.Kh. (2014). O rasseyanii v transformatorakh [On the transformer leakage]. Energoekspert, 6, 30-33 (in Russian).
- [6] Markvardt, E.G. (1936). Induktivnosti rasseyaniya obmotok transformatora [Leakage inductances of transformer windings]. Elektrichestvo, 23, 26-31 (in Russian).
- [7] Petrov, G.N. (1936). Ob induktivnostyakh rasseyaniya obmotok transformatora [On the leakage inductances of transformer windings]. Elektrichestvo, 23, 31-32 (in Russian).
- [8] Bessonov, L.A. (1996). Teoreticheskie osnovy elektrotehniki. Elektricheskie tsepi, M. Vysshaya shkola, 638 (in Russian).
- [9] Kalantarov, P.L., Tseitlin, L.A. (1986). Raschet induktivnostei. Spravochnaya kniga. Leningrad, Energoatomizdat, 488 (in Russian).
- [10] Fawzi, T.H., Burke, P.E. (1978). The accurate computation of self and mutual inductances of circular coils, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 97, 2, 464–468. DOI: 10.1109/TPAS.1978.354506.
- [11] Bunin, A.G., Kontorovich, L.N. (1975). Raschet impulsnykh perenapryazhenii v obmotkakh transformatorov s uchetom vliyaniya magnitoprovoda [Calculation of impulse overvoltages in transformer windings taking into account the influence of the magnetic circuit]. Elektrichestvo, 7, 50-54 (in Russian).
- [12] Martinez-Velasco J.A., Mork, B.A. (2003). Transformer modeling for low frequency transients – The state of the art. International Conf. Power Systems Transients – IPST 2003 in New Orleans, USA.
- [13] Lur'e, A.I. (2008). Protsess vklyucheniya transformatora na kholostoi khod i korotkoe zamykanie [Processes at turning on the transformer at idle and short circuit]. Elektrotehnika, 2, 2-18 (in Russian).
- [14] Kulkarni, S.V., Khaparde, S.A. (2004). Transformer engineering: Design and practice. New York: Marcel Dekker.
- [15] Chiesa, N, Mork, B.A., Høidalen, H.K. (2010).



- Transformer model for inrush current calculations: Simulations, measurements and sensitivity analysis. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 25, 4, 2599–608. DOI: doi.org/10.1109/TPWRD.2010.2045518.
- [16] De Leon, F., Farazmand, A. and Joseph P. (2012). Comparing the T and  $\pi$  equivalent circuits for the calculation of transformer inrush currents. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 27, 4, 2390-2398. DOI: 10.1109/TPWRD.2012.2208229.
- [17] Zirka S.E., Moroz Yu.I., Moroz E.Yu., Tarchutkin A.L. (2012). Topologicheskie modeli transformatora [Топологические модели трансформатора. [Topological transformer models] *Elektrichestvo*, 10, 33-42 (in Russian)
- [18] Zirka, S.E., Moroz, Y. I., Arturi, C. M., Chiesa, N. and Høidalen, H.K. (2012). Topology-correct reversible transformer model. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 27, 4, 2037-2045. DOI: 10.1109/TPWRD.2012.2205275.
- [19] Cherry, E.C. (1949). The duality between interlinked electric and magnetic circuits and the formation of transformer equivalent circuits. *Proceedings of the Physical Society*, B, 62, 101–111.
- [20] <https://www.emtp.org>.
- [21] Zirka S.E., Moroz Yu.I., Moroz E.Yu. (2010). Inversnaya model magnitnogo gisterezisa [Inverse model of magnetic hysteresis]. *Tekhnicheskaya elektrodinamika*, 4, 3-7 (in Russian).
- [22] Zirka, S.E., Moroz, Y.I., Harrison, R. G., Chiesa, N. (2014). Inverse hysteresis models for transient simulation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 29, 2, 552-559. DOI: 10.1109/TPWRD.2013.2274530.
- [23] Zirka, S.E., Moroz, Y.I., Chiesa, N, Harrison, R.G., Høidalen, H.Kr. (2015). Implementation of inverse hysteresis model into EMTP —Part I: Static model. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 30, 5, 2224-2232. DOI: 10.1109/TPWRD.2015.2416201.
- [24] Zirka, S.E., Moroz Y.I., Chiesa N., Harrison R.G., Høidalen H.Kr. (2015). Implementation of inverse hysteresis model into EMTP – Part II: Dynamic model. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 30, 5, 2233–2241. DOI: doi.org/10.1109/TPWRD.2015.2416199.
- [25] Jazebi, S., Zirka, S.E., Lambert, M., Rezaei-Zare, A., Chiesa, N., Moroz, Y., Chen, X., Martinez-Duro, M., Arturi, C.M., Dick, E.P., Narang, A., Walling, R.A., Mahseredjian, J., Martinez, J.A., de León, F. (2016). Duality derived transformer models for low-frequency electromagnetic transients—Part I: Topological models, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 31, 5, 2410-2419. DOI: 10.1109/TPWRD.2016.2517327.
- [26] Shakirov, M.A. (2016).  $2n$ T-shaped equivalent circuit of a transformer comprising  $n$  windings. *St. Petersburg Polytechnic University Journal of Engineering Sciences and Technology*. 3(249), 49-63. DOI: 10.5862/JEST.246.6.
- [27] Arturi, C.M. (1994). Model of a highly saturated three-phase autotransformer with tertiary winding and five-limb core and analysis of a time-varying short-circuit transient, *European Transactions on Electrical Power*, 4, 6, 513-524. DOI: <https://doi.org/10.1002/etep.4450040620>.
- [28] Edelmann, H. (1959). Descriptive determination of transformer equivalent circuits. *Arch. elektr. Ubemagung* 13, 253–261 (in German).
- [29] Zhao, J., Zirka, S.E., Moroz, Y.I., Arturi, C.M. (2020). Structure and properties of the hybrid and topological transformer models, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 118, 105785. DOI: doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.105785.
- [30] Boyajian, A. (1924). Theory of three-circuit transformers. *Journal AIEE*; 43, 4, 345–355. DOI: <https://doi.org/10.1109/JAIEE.1924.6535983>.
- [31] Zirka S.E., Moroz Yu.I., Moroz E.Yu., Tarchutkin A.L. (2010). Modelirovanie perekhodnykh protsessov v transformatore s uchetom gisterezisnykh svoystv magnitoprovoda [Modeling of transformer transients taking into account hysteresis properties of the core. *Tekhnicheskaya elektrodinamika*. 2, 11-20 (in Russian).
- [32] Zirka, S.E., Moroz, Y.I., Arturi, C.M., Elovaara, J., Lahtinen, M. (2018). Topological reversible model of three-phase five-limb transformer. *Electrical Engineering and Power Engineering*. 3, 6–13. DOI: 10.15588/1607-6761-2018-3-1.
- [33] Karsai, K, Kerényi, D, Kiss, L. (1987). Large power transformers. New York: Elsevier, 614.

UDC 621.313

## A ENERGY EFFICIENT ELECTRIC DRIVE OF AIR UNITS

- KOTSUR I.M.** PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electrical Machines, Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: igor.m.kotsur@gmail.com; ORCID: 0000-0001-6394-7849;
- HURAZDA A.V.** student of the Department of Electrical Machines, Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: artemgurazda@gmail.com; ORCID: 0000-0002-5853-2339;
- DOLIA B.A.** student of the Department of Electrical Machines, Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: bgdn.n@mail.com; ORCID: 0000-0002-2980-9538;
- SHESTOV L.E.** student of the Department of Electrical Machines, Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: luka84867@gmail.com; ORCID: 0000-0001-7255-3729

**Purpose.** Improving the efficiency and energy performance of an asynchronous electric drive for stationary fan's units of the main ventilation line of mines.

**Methodology.** The research was carried out using the methods of the theory of electrical circuits, mathematical physics, simulation, interpolation and approximation

**Findings.** The research of electromagnetic and energy processes in the asynchronous electric drive system with pulse control at a fan load, taking into account the variable aerodynamic parameters of the main ventilation line of mines. An electric drive system is able to respond with high accuracy and reliability to changes in the aerodynamic parameters of the main ventilation line of mines has been proven. This will also increase the power factor of the electric drive at a fan load up 0.8 to 0.93 p.u., and the efficiency up 92.5% to 94.5%, when regulating in the range of the operating slip of the rotor of the drive fan motor  $s = 0.5 \div s_{rated}$ , which, respectively, is on average up 0,25% to 40 higher in comparison with systems of an unregulated electric drive. Recommendations has been developed for the design and rational selection of the rated fan capacity for the main ventilation line to advance the best energy efficiency level of the electric drive.

**Originality.** The research of electro-mechanical, electro-energy power and aerodynamic processes in the dynamic modes of the fan electric drive was carried out. The fan-loaded "induction motor-converter" system has been proven to be self-regulating. It is able to respond with high accuracy and reliability even at low switching frequencies of the power chopper to any changes of the aerodynamic parameters of the main ventilation line of mines.

**Practical value.** Recommendations has been developed for the design and rational selection of the rated fan capacity for the main ventilation line to advance the best energy efficiency level of the electric drive.

**Keywords:** converter; fan unit; energy efficiency; pressure; pulse regulating

### I. INTRODUCTION

Ventilation of mines with main ventilation fans (MVF) is the most energy-intensive technological process. Average rated power of fan drives 1000 - 1600 kW, and for the most powerful units up to 4000 kW. Therefore, the electricity consumption of the MVF reaches to 30% of the total consumption at the mine. The MVF park at the mines of the region (481 units) is rundown by more than 77%. At the same time 370 fans worked for two or more standard periods [1]. Almost all mines for MVF use unregulated electric drive systems. A characteristic feature of the mine ventilation line determines the operating mode of the MVF. The mode of operation of the MVF is constantly changing (variable) aerodynamic resistance during the operation of the mine (aerodynamic resistance, which changes during the operation of the mine). This is due to a change in the configuration of the ventilation scheme, the length and

cross-sectional area of mine workings, the nature of the surface of their walls, the state of ventilation structures and mine's production, as well as other factors [2]. Only after some time (5 - 10 years) the line resistance becomes comparable to its initial calculated (prospective) value. According to the centrally-doubled ventilation scheme, the resistance changes in relation to the calculated one by an average of 4-10 times. For diagonally ventilation scheme - from one and a half to 2.5 times [2]. The mode of operation of the MVF is significantly affected by the depression of natural draft, which changes cyclically throughout the year. The required air consumption by a mine does not always depend on the intensity of emission of harmful gases, the number of ventilated objects, and air leaks in mine's production. Based on the foregoing, it can be concluded that it is advisable to regulate the parameters of MVF. In recent years, the productivity of most of the mines has decreased and the number of operating working mine bottom at relatively successful

enterprises has decreased. As a result, air demand of mines has decreased, that the efficiency of many units has decreased, which leads to high electricity consumption. In order to increase the efficiency of a significant amount of MVF, a providing the lowest motor speed is possible. his can be done with help the use of energy efficient electric drive control systems.

## II. ANALYSIS OF LAST RESEARCHES

In order to increase the efficiency of a significant amount of MVF, it is possible to applying lower rotor speed of induction motor, with help energy-efficient electric drive control systems, such as frequency converters (FC), inductor-capacitive converters (ICC) and converters according to the asynchronous-valve cascade (AVC) scheme. With these systems it is possible to independently control the speed and torque of the electric motor (asynchronous or synchronous) [3] - [5]. However, the frequency converters and the inductor-capacitive converters has a large rated power, which is commensurate with the power of the VGP motor. In addition, the application of the frequency converters and the inductor-capacitive converters for the high-voltage electric drive MVF is limited in using of the voltage class of the semiconductor elements of the converters.

In [6] - [7] a system of asynchronous electric drive with pulse control is proposed, which combines the positive control characteristics of classical pulse control with the possibility of energy recuperation into the network. In comparison with the inductor-capacitive converters, the asynchronous electric drive with pulse control allows independently saving a AC in the rotor with changing parameters of the induction motor in the subsynchronous range of rotor speed [8]. The asynchronous electric drive with pulse control has proved itself well in electric drives of lifting-and-shifting mechanisms, and can also be effectively used for powerful high-voltage electric drives of fan units, where the use of high-voltage frequency converters leads to a significant increase their cost. The source of current (torque) in the rotor of the asynchronous electric drive with pulse control for controlling fan loads makes it possible, at a given air pressure, to automatically select the operating point of the flow-pressure characteristics of the ventilated object or hydraulic supply object, at a variable air flow rate. The asynchronous electric drive with pulse control improves the energy efficiency of the units and mechanisms in various industries [9].

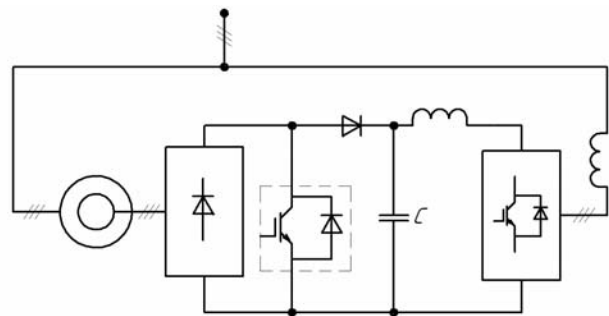
Therefore, an urgent task is to research the control properties and energy efficiency indicators of an asynchronous electric drive with pulse control with a fan load, which ensures satisfactory electromagnetic compatibility with the network. Thus, the purpose of the work is to increase the efficiency and energy performance of an asynchronous electric drive with pulse control with a fan load.

## III. FORMULATION OF THE WORK PURPOSE

The purpose of the work is improving the efficiency and energy performance of an asynchronous electric drive for stationary fan's units of the main ventilation line of mines.

## IV. EXPOUNDING THE MAIN MATERIAL AND RESULTS ANALYSIS

In fig. 1 shows the asynchronous electric drive with pulse control system. A feature of this system is the presence of a pulse regulator in the rectified current circuit of the rotor, which performs the function of a pulse DC voltage converter. When the key is opened, the sleep-energy of the rotor is recovered to the network at a constant inversion angle of a low-power inverter. This ensures the minimum consumption of reactive energy from the network and will improve the power factor of the asynchronous electric drive in the full range of rotor speed.



**Figure 1.** The Asynchronous electric drive with pulse control system

To research the control properties and energy efficiency indicators of an asynchronous electric drive in the structure of Simulink of the MatLAB software, a complex simulation model of electromagnetic and energy processes was developed. It includes: a subsystem of the model of a high-voltage induction motor with a wound rotor, created according to generally accepted assumptions [10] - [12]; the subsystem of the model of the control channel in the rectified current rotor, according to [13]; a mathematical block for calculating energy indicators, according to [13], as well as a subsystem of the aerodynamic model.

The subsystem of the aerodynamic model is described by the following expressions [15]:

$$M = M_i + k \cdot \omega_r^n, \quad (1)$$

$$k \cong (M_{rated} - M_i) / \omega_{rated}^n, \quad (2)$$

$$M_{rated} = \frac{H \cdot Q}{\eta \cdot \omega_r}, \quad (3)$$

where  $M_i$  is the idling torque (the torque of starting the system), Nm;  $\omega_{rated}$  - rated speed of the motor, rad / s;  $\omega_r$  - operating speed of the motor, rad/s;  $n$  - exponent, a value that depends on the type of unit (for fan load  $n=2$ );  $\eta$  - coefficient of efficiency of the fan;  $H$  - fan pressure, Pa;  $Q$  - volumetric fan air output, m<sup>3</sup>/s.

The relationship between the fan air output and the pressure in the main ventilation line can be expressed by following relationship [15]:

$$H = R \cdot Q^2, \tag{4}$$

where  $R$  is the resistance of the main ventilation line, Pa s<sup>2</sup>/m<sup>6</sup>.

The current limitation in the subsystem of the asynchronous model is performed by the control subsystem, i.e. pulse width modulator. It provides independent setting of the pulse duty cycle  $\gamma$  and the switching frequency  $f_k$ .

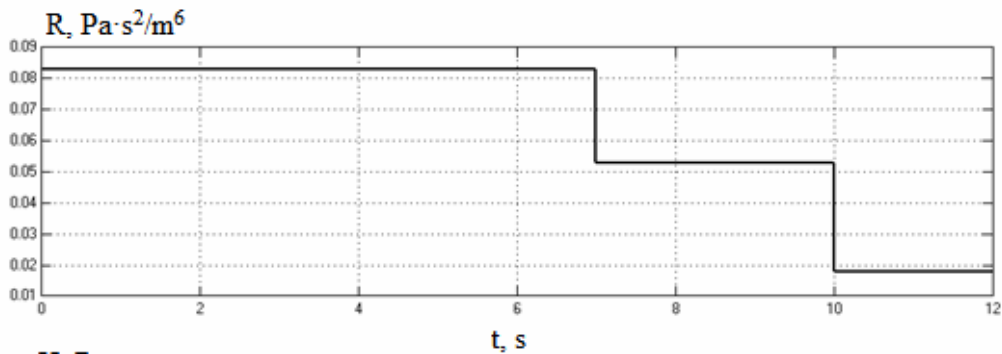
The input parameters of the asynchronous electric drive control subsystem are: rated pressure in the main ventilation line of a coal mine  $H_{rated}$ ; effective values of pressure  $H$  and volumetric fan air output  $Q$ . The subsystem of the regulation model provides self-regulation for required pressure  $H_{rated}$  by changing the speed of the induction motor  $\omega_r$ ; This value is set by the value of the pulse duty cycle  $\gamma$  with time sampling  $T$ :

$$\begin{cases} \gamma_i = \gamma_{i-1} + k_i(T_i) & \text{if } H \leq H_{rated} \\ \gamma_i = \gamma_{i-1} - k_i(T_i) & \text{if } H > H_{rated} \end{cases} \tag{5}$$

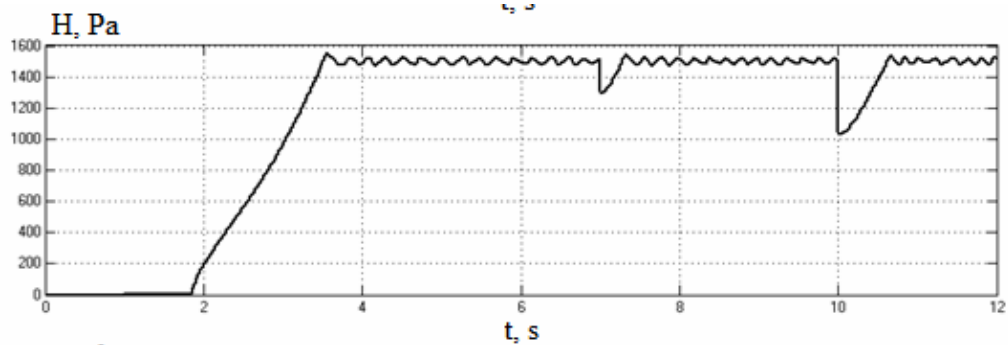
where  $k_i$  is a discrete value, that characterizes the rate of change  $\gamma$  at sampling time  $T$ .

In fig. 2 shows the simulation results in the form of oscillograms of aerodynamic indicators and control parameters: mine line resistance  $R$  (fig. 2, a); the pressure in the mine line  $H$  (fig. 2, b); volumetric fan air output  $Q$  (fig. 2, c); the torque of the induction motor (fig. 2, d); pulse duty cycle  $\gamma$  (fig. 2, e); rotor speed (fig. 2, e), for induction motor type AK-4, 1000 kW at switching frequency  $f_k = 600$  Hz.

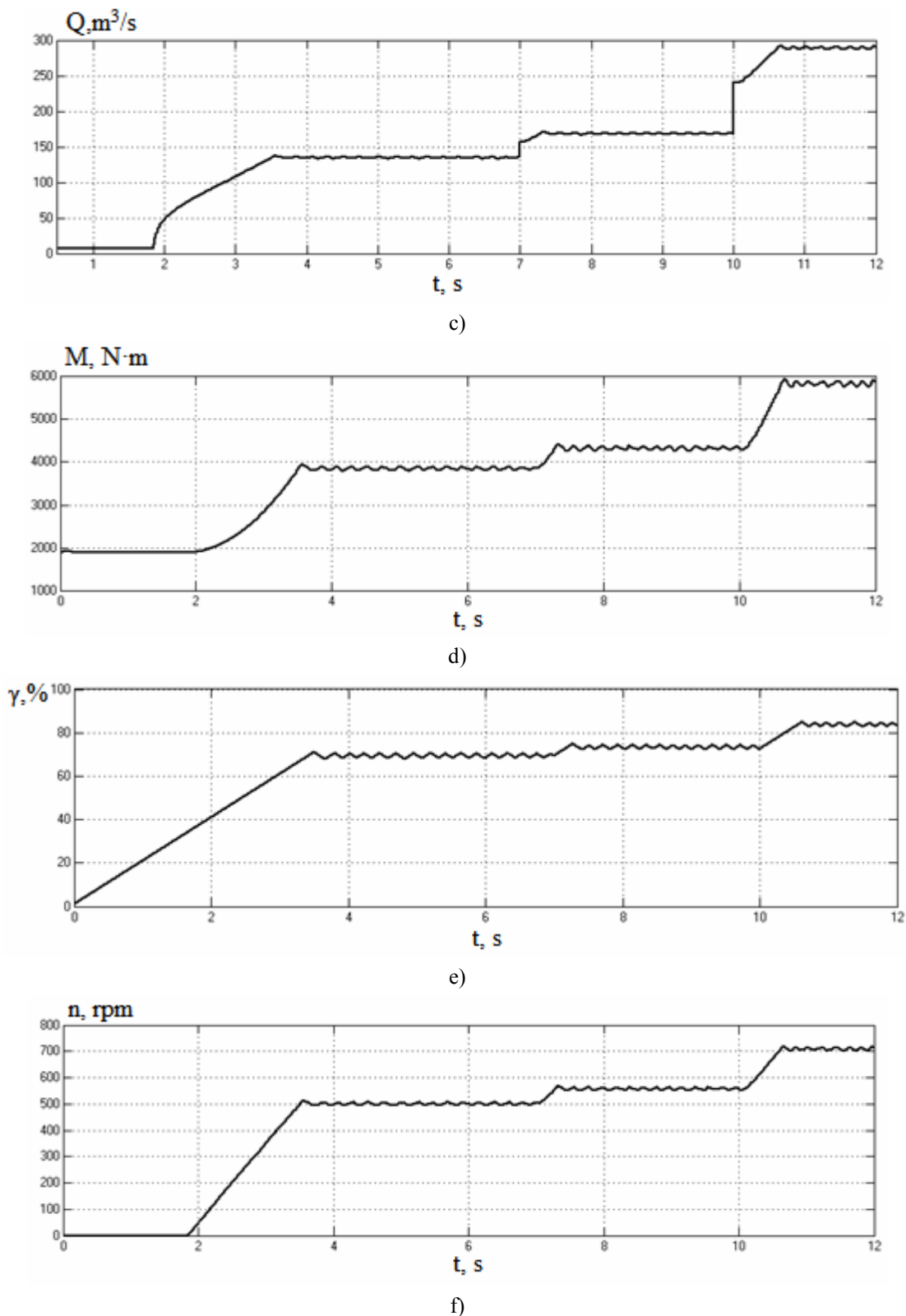
On oscillograms showed the period of speed-up of the induction motor ( $t = 0 \div 3.5$  sec.), as well as the quasi-steady operation mode of asynchronous electric drive with pulse control system ( $t = 3.5 \div 7$  sec.) with a constant resistance of the mine ventilation line  $R = 0,083$  Pa·s<sup>2</sup>/m<sup>6</sup>. At the time  $t = 7$  sec, the simulation of the change the resistance of the mine ventilation line  $R$  from  $0.083$  Pa·s<sup>2</sup>/m<sup>6</sup> to  $0.053$  Pa·s<sup>2</sup>/m<sup>6</sup> is performed. At the time 10 sec., the mine ventilation line changing up  $0.053$  Pa·s<sup>2</sup>/m<sup>6</sup> to  $0.018$  Pa·s<sup>2</sup>/m<sup>6</sup>, which indicates about inflation in coal production in the mine. As a result of a abrupt decrease in the resistance of the mine ventilation line, the pressure in the main line decreases.



a)



b)



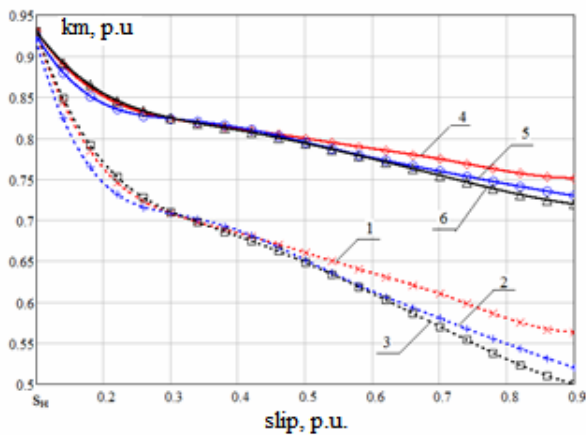
**Figure 2.** Simulation results in the form of oscillograms of aerodynamic indicators and control parameters of asynchronous electric drive with pulse control system for induction motor type AK-4, 1000 kW

The asynchronous electric drive with pulse control system respond on a change value of the pressure  $H$  in the main line by setting a larger value of the

pulse duty cycle  $\gamma$  according to (5) until the fan pressure  $H$  reaches the rated value  $H_{rated}$ .

Thus, an increase of the pressure in the mine line is provided by an increase in the rotor current, therefore, the torque of the induction motor. At the time of self-regulation, with a smooth change in the pulse duty factor ( $\gamma$ ), the appearance of rush components of AC and the induction motor torque is excluded, ensuring the stable operation of the electric drive system.

In fig. 3 shows the calculated values of the power factors of the induction motor type AK-4 (curves 1, 2, 3), as well as the overall power factor of the drive (curves 4, 5, 6), respectively, for the rated power of the induction motor 630, 800 and 1000 kW. It follows from the analysis, that the use of an asynchronous electric drive with pulse control system will allow increase the power factor of the fan units by 0.25 p.u. compared to an unregulated electric drive system due to the operation of the inverter with a constant minimum inversion angle  $\beta$ . In this case, the inverter power uses a minimum amount of reactive power from the network. A decrease of the power factor with an increasing of the working slip rotor of the induction motor is caused by a decrease of the c power uses of active power from the network. As well as an increasing of higher harmonics of the stator and rotor currents of the induction motor. This is due to the fact, that the value of the harmonic distortion factor of the stator and rotor of the induction motor is inversely proportional to the value of the pulse duty cycle  $\gamma$  [16] - [17].

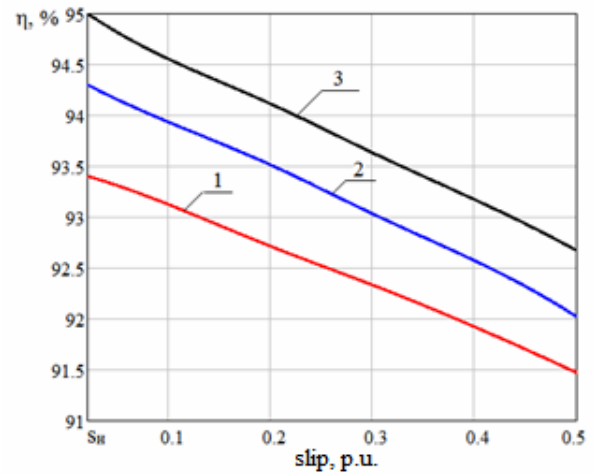


- 1 – for electric drive system, 630kW;  
 2 – for for electric drive system 800kW;  
 3 – for for electric drive system 1000kW;  
 4 – for induction motor, 630kW;  
 5 – for induction motor 800kW;  
 6 – for induction motor 1000kW;

**Figure 3.** Dependences of the power factor of induction motor for type AK-4 and the power factor of asynchronous electric drive with pulse control system on the working slip

The use of asynchronous electric drive with pulse

control system for fan units will also allow saving the overall efficiency in the subsynchronous rotor speed range on high level up 92 to 94.5%. (fig. 4).



- 1 – for electric drive system, 630kW;  
 2 – for for electric drive system 800kW;  
 3 – for for electric drive system 1000kW;

**Figure 4.** Calculated dependences of the efficiency of the asynchronous electric drive with pulse control system on the value of the induction motor operating slip

According to fig. 3, fig. 4, the optimal level of energy efficiency is ensured in the range of working rotor sleep  $s = 0.5 \div s_{rated}$ . Therefore, at designing of the asynchronous electric drive with pulse control system for fan units, it is necessary that the initial and final calculated values of aerodynamic resistance  $R$ , as well as the required value of the line pressure  $H$ , be selected in such a way, that the range of operating sleeps of the induction motor equal to  $s = 0.5 \div s_{rated}$ . In addition, the induction motor should be selected with the highest possible rated power and could ensure the operation of the fan in the range of specified operating rotor sleeps of the induction motor.

Thus, the asynchronous electric drive with pulse control system for the fan units of the mine ventilation line allows ensure:

- high level of the energy efficiency;
- self-regulation of aerodynamic parameters;
- to reduce capital costs in the process of upgrading the asynchronous electric drive with pulse control system for fan units.

This will increase their stability and reliability, thus reducing the level of accidents at mines in Ukraine.

## V. CONCLUSION

The research of electromagnetic and energy processes in the asynchronous electric drive system with pulse control at a fan load, taking into account the

variable aerodynamic parameters of the main ventilation line of mines. A electric drive system is able to respond with high accuracy and reliability to changes in the aerodynamic parameters of the main ventilation line of mines has been proven. This will also increase the power factor of the electric drive at a fan load up 0.8 to 0.93 p.u., and the efficiency up 92.5% to 94.5%, when regulating in the range of the operating slip of the rotor of the drive fan motor  $s = 0.5 \div s_{rated}$ , which, respectively, is on average up 0,25% to 40 higher in comparison with systems of an unregulated electric drive.

Recommendations has been developed for the design and rational selection of the rated fan capacity for the main ventilation line to advance the best energy efficiency level of the electric drive.

#### REFERENCE

- [1] Mazin, V. A., Olhovskiy O. V., Kostenko V. A. (2008). Reduction of power consumption for ventilation of the mines. *Ugol Ukrainyi*, 8, 19–21.
- [2] Varenik E. A., Omelchenko N. A., Dubinsky A. A., Labeznik R. M. (2010). Energy saving concept for stationary installations in coal mines. *Ugol Ukrainyi*, 3, 7-20/
- [3] Onischenko, G. B. (1967). Wound-rotor slip recovery system. *Moscow, Energiya*, 152
- [4] Braslavskiy I. Ya., Ishmatov Z.Sh., Polyakov V.N. (2004). Energy-saving asynchronous electric drive. *Moscow, Akademiya*, 256
- [5] Volkov I. V., Stiazhkin S.V., Podolnyi S. V. (2009). System of stabilized current for automated electric drives. *Trudih Institutu Elektrodinamiki NAN Ukrainih*, 23, 64-72
- [6] Kotsur M. I., Andrienko P. D., Kotsur I. M. (2012). Features of the operating modes of the modified pulse control system of an induction motor with a wound rotor. *Electromechanical and energy saving systems*, 3(19), 163-165
- [7] Kotsur M.I., Andrienko P.D., Kotsur I. M., Bliznyakov O.V. (2017). Converter for frequency-current slip-power recovery scheme. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 4, 49-54
- [8] M. Kotsur, D. Yarymbash, I. Kotsur, Yu. Bezverkhnia (2018). Speed Synchronization Methods of the Energy-Efficient Electric Drive System for Induction Motors. *IEEE: 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), February 20-24, Lviv-Slavske, Ukraine*, 304-307 DOI:10.1109/TCSET.2018.8336208
- [9] Kotsur M. I., Andrienko P. D., Kotsur I. M. (2013). Comparative analysis of energy efficiency of control systems for an induction motor with a wound rotor. *Polzunovskiy vestnik*, 4(2), 114-120
- [10] Kopylov, I. P. (2001). Mathematical modeling of electrical machines. *Moscow, Vysshaya shkola*, 327
- [11] Yarymbash, D., Kotsur, M., Subbotin, S., Oliinyk, A. A (2017). New Simulation Approach of the Electromagnetic Fields in Electrical Machines. *IEEE: The International Conference on Information and Digital Technologies, July 5th - 7th, Zilina, Slovakia*, Catalog Number CFP17CDT-USB, 452-457 DOI: 10.1109/DT.2017.8024332
- [12] M. Kotsur, D. Yarymbash, S. Yarymbash, I. Kotsur (2017). A New Approach of the Induction Motor Parameters Determination in Short-Circuit Mode by 3D Electromagnetic Field Simulation. *International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF), October 17th - 20th, Lviv, Ukraine*, 207-210 DOI:10.1109/YSF.2017.8126620
- [13] Chermalyih, V. M., Chermalyih A. V., Danilin A. V., Maydanskiy I. Ya. (2009). Operating modes simulation of the electromechanical systems with considering of the load type. *Visnik KDPU Imeni Mihayla Ostrogradskogo*, 4 (57), 107-111
- [14] Kotsur, M. I., Kotsur, I. M., Andrienko, A. A., & Andrienko, D. S. (2016). Determination of the optimal switching frequency of the power switches of the frequency-current asynchronous-gate cascade converters. *Electrical Engineering and Power Engineering*, (1), 5–11. <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2016-1-1>
- [15] Antoshchenko N.I., Kalyuzhny V.V., Koptikov V.P., Tynda G. B., Andrienko P. D., Sadovoy A. V. (2014). A new approach to the regulation of ventilation in coal mines. *Ugol Ukrainyi*, 3, 29–32.
- [16] Leonharn, W (1985). Control of Electric Drives Springer. Berlin, Verlag, 123
- [17] Bose, B. (1988). Power electronics and AC drive. Manchester, Englewood Cliffs, 456

The article was received 20.12.2020

## ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИЙ ЕЛЕКТРОПРИВІД ВЕНТИЛЯЦІЙНИХ УСТАНОВОК

КОЦУР І.М.

канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електричних машин НУ "Запорізька політехніка", Запоріжжя, Україна, e-mail: igor.m.kotsur@gmail.com; ORCID: 0000-0001-6394-7849;

ГУРАЗДА А.В.

студент кафедри електричних машин НУ "Запорізька політехніка", Запоріжжя, Україна, e-mail: artemgurazda@gmail.com; ORCID: 0000-0002-5853-2339;

ДОЛЯ Б.О. студент кафедри електричних машин НУ "Запорізька політехніка", Запоріжжя, Україна, e-mail: bgdn.dl@gmail.com; 0000-0002-2980-9538;

ШЕСТОВ Л.Є. студент кафедри електричних машин НУ "Запорізька політехніка", Запоріжжя, Україна, e-mail: luka84867@gmail.com; ORCID: 0000-0001-7255-3729.

**Мета роботи.** Підвищення ефективності роботи і енергетичних показників асинхронного електроприводу для стаціонарних установок вентиляторів магістралі головного провітрювання шахт.

**Методи дослідження.** Дослідження проводились із застосуванням методів теорії електричних кіл, математичної фізики, імітаційного моделювання, інтерполяції та апроксимації.

**Отримані результати.** Проведено дослідження електромагнітних і енергетичних процесів в системі асинхронного електроприводу з імпульсним регулюванням при вентиляторному навантаженні з урахуванням змінних аеродинамічних параметрів магістралі головного провітрювання шахт. Встановлено, що система електроприводу здатна з високою точністю і надійністю реагувати на зміни аеродинамічних параметрів магістралі головного провітрювання шахт, а також дозволить підвищити коефіцієнт потужності електроприводу при вентиляторному навантаженні до  $0,8 \div 0,93$ , і коефіцієнта корисної дії до  $(92,5 \div 94,5)\%$  при регулюванні в діапазоні робочих ковзань ротора привідного вентиляторного двигуна  $s = 0,5 \div s_n$ , що відповідно в середньому на 0,25 і 40% вище в порівнянні з системами нерегульованого електроприводу. Розроблено рекомендації з проектування та раціонального вибору встановленої потужності вентилятора для магістралі головного провітрювання для забезпечення найкращого рівня енергоефективності електроприводу.

**Наукова новизна.** Проведено дослідження електромеханічних, електроенергетичних та аеродинамічних процесів в динамічному режимі електроприводу вентилятора. Доведено, що система "асинхронний двигун-перетворювач" з вентиляторним навантаженням є саморегулюючою, тобто здатна реагувати з високою точністю і надійністю навіть при низьких частотах комутації силового ключа на будь-які зміни аеродинамічних параметрів мережі головного провітрювання шахт.

**Практична цінність.** Розроблено рекомендації з проектування та раціонального вибору встановленої потужності вентилятора для магістралі головного провітрювання для забезпечення найкращого рівня енергоефективності електроприводу.

**Ключові слова:** перетворювач, вентиляторна установка, енергоефективність, тиск, імпульсне регулювання.

## ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД ВЕНТИЛЯТОРНЫХ УСТАНОВОК

КОЦУР И. М. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры электрических машин НУ «Запорожская политехника», Запорожье, Украина, e-mail: igor.m.kotsur@gmail.com; ORCID: 0000-0001-6394-7849;

ГУРАЗДА А.В. студент кафедры электрических машин НУ «Запорожская политехника», Запорожье, Украина, e-mail: artemgurazda@gmail.com; ORCID: 0000-0002-5853-2339;

ДОЛЯ Б.А. студент кафедры электрических машин НУ «Запорожская политехника», Запорожье, Украина, e-mail: bgdn.dl@gmail.com; ORCID: 0000-0002-2980-9538;

ШЕСТОВ Л.Е. студент кафедры электрических машин НУ «Запорожская политехника», Запорожье, Украина, e-mail: luka84867@gmail.com; ORCID: 0000-0001-7255-3729.

**Цель работы.** Повышение эффективности работы и энергетических показателей асинхронного электропривода для стационарных установок вентиляторов магистралей главного проветривания шахт.

**Методы исследования.** Исследования проводились с применением методов теории электрических цепей, математической физики, имитационного моделирования, интерполяции и аппроксимации.

**Полученные результаты.** Проведено исследование электромагнитных и энергетических процессов в системе асинхронного электропривода с импульсным регулированием при вентиляторной нагрузке, с учетом переменных аэродинамических параметрах магистралей главного проветривания шахт. Установлено, что система электропривода способна с высокой точностью и надежностью реагировать на изменения аэродинамических параметров магистралей главного проветривания шахт, а также позволит повысить коэффициент мощности электропривода при вентиляторной нагрузке до  $0,8 \div 0,93$ , и коэффициента полезного действия до  $(92,5 \div 94,5)\%$  при регулировании в диапазоне рабочих скольжений ротора приводного вентиляторного двигателя  $s = 0,5 \div s_n$ , что соответственно в среднем на 0,25 и 40% выше по сравнению с системами нерегулируемого электропривода. Разработаны рекомендации по проектированию и рациональному выбору установленной мощности вентилятора для магистралей главного проветривания для



обеспечения наилучшего уровня энергоэффективности электропривода.

**Научная новизна.** Проведено исследование электромеханических, электроэнергетических и аэродинамических процессов в динамическом режиме электропривода вентилятора. Доказано, что система "асинхронный двигатель-преобразователь" с вентиляторной нагрузкой является саморегулирующейся, то есть способна реагировать с высокой точностью и надежностью даже при низких частотах коммутации силового ключа на любые изменения аэродинамических параметров сети главного проветривания шахт.

**Практическая ценность.** Разработаны рекомендации по проектированию и рациональному выбору установленной мощности вентилятора для магистрали главного проветривания для обеспечения наилучшего уровня энергоэффективности электропривода.

**Ключевые слова:** преобразователь, вентиляторная установка, энергоэффективность, давление, импульсное регулирование.

УДК 663.033

## ЗАЛЕЖНІСТЬ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ВИТРАТ ВІД ТИПУ ВИКОРИСТАНОЇ МЕХАНІЧНОЇ МІШАЛКИ У БІОГАЗОВОМУ РЕАКТОРІ

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;

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;

**Мета роботи.** Дослідження залежності енергетичних витрат механічних мішалок та визначення енерго-ефективного типу перемішуючого пристрою для підвищення енергетичної ефективності процесу утворення біогазу та рентабельності подальшої переробки у теплову та електричну енергію.

**Методи дослідження.** Визначення та аналіз енергетичних витрат для механічних мішалок, порівняння та визначення їх енергоспоживання у процесі утворення біогазу, 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. Не зважаючи на велику кількість різноманітних типів перемішуючих пристроїв та систем, основне завдання перемішування полягає у створенні однорідної речовини з однаковою температурою, кислотністю та іншими фізико-хімічними складовими у будь-якій точці об'єму речовини. Існує необхідність підвищення енергоефективності процесів інтенсифікації анаеробного зброджування та рентабельності подальшої переробки біогазу у теплову та електричну енергію. Шляхи підвищення енергоефективності полягають у визначенні залежності енергетичних витрат механічних мішалок, виборі енергоефективного типу мішалки, визначенні критеріїв, що суттєво впливають на споживання електричної енергії на перемішування, дослідженні векторів розповсюдження потоків, що створюються мішалкою. Реалізація цих дій дозволить встановити оптимальні геометричні розміри мішалки та суттєво підвищити енергетичну ефективність біогазових установок та подальшу переробку утвореного біогазу у теплову та електричну енергію.

**Наукова новизна.** Проведено аналіз причин різних значень критерію Ейлера для механічних мішалок за однакового режиму руху речовини її рівня і об'єму у резервуарі та інших однакових параметрах. Проведено порівняльний аналіз енергетичних витрат для найбільш розповсюджених у біогазових реакторах типів механічних мішалок. Встановлено, що використання двоярусної лопатевої мішалки, у якій по дві лопати на ярус необхідно найменша кількість енергії на перемішування відходів у біогазовому реакторі об'ємом  $V_{reak} = 5 \text{ м}^3$ .

**Практична цінність.** Приведені у роботі дані можуть бути використані при проектуванні, будівництві та модернізації біогазових установок. Визначено напрям необхідних подальших наукових досліджень, реалізація яких підвищить енергетичну ефективність біогазового виробництва та рентабельність подальшої переробки біогазу у теплову та електричну енергію.

**Ключові слова:** енергоефективність; критерій Рейнольдса; критерій Ейлера; перемішування; потужність електродвигуна; енергоспоживання.

### I. ВСТУП

Біогазові технології відіграють важливу роль у формуванні сучасної енергетичної системи, тому увага до її 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 е

джерелами небезпечних викидів метану та окисів азоту [1]. Така ситуація призводить до забруднення повітря та посилення кліматичних змін та парникового ефекту. Найбільшого розповсюдження для утилізації побутових та промислових відходів, каналізаційних стічних вод отримала аеробна та анаеробна обробка у спеціальних резервуарах – біогазових реакторах [2].

На сьогоднішній день зброджування органічних відходів у біогазових установках є одним з найпрогресивніших, екологічно та економічно вигідних рі-

шень для отримання енергії з відходів у вигляді біогазу. Поряд з цим, побічним ефектом зброджування органічних відходів є отримання цінних екологічно чистих добрив.

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

Органічні відходи у біогазовому реакторі у процесі анаеробного бродіння мають властивість розділятися на фракції. На дні реактора відбувається скупчення важких частин у вигляді осаду, легкі частини сировини за допомогою бульбашок газу піднімаються на поверхню сировини утворюючи шар кірки. Середина між кіркою та осадом заповнена рідкою частиною відходів. Це має суттєвий вплив на інтенсивність вироблення біогазу.

Процес анаеробного зброджування відходів є довготривалим, тому одним з основних методів інтенсифікації біогазового виробництва є перемішування органічних відходів у процесі анаеробного бродіння [3], [4].

Метою перемішування органічних відходів є забезпечення рівномірного розподілу фаз по об'єму реактора, руйнування плаваючої кірки, підтримка твердої фракції у зваженому стані, рівномірне розподілення температурних полів по об'єму відходів. Таким чином, на підставі вище зазначеного можна виділити основне завдання перемішування, що полягає у створенні однорідної речовини з однаковою температурою, кислотністю та іншими фізико-хімічними складовими у будь-якій точці об'єму.

Рентабельність використання біогазових установок безпосередньо залежить від енергоефективності процесів інтенсифікації анаеробного зброджування, тому при виборі типу перемішувального пристрою особливу увагу приділяють енергетичним витратам, які залежать від багатьох умов. Через, що у світі відбувається безліч наукових досліджень у напрямку створення енергоефективного типу перемішування органічних відходів у біогазових реакторах.

## II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

На сьогоднішній день відомо велику кількість типів перемішування, серед яких пневматичне, гідравлічне [3], [5], за допомогою заглиблених електричних двигунів [6], [7], електромеханічних перетворювачів [8], однак з точки зору енергозбереження, найбільш перспективним обладнанням для інтенсифікації процесу зброджування органічних відходів є біогазові реактори із механічними мішалками [3], [9]-[13]. Про це свідчить велика кількість досліджень впливу механічних мішалок на речовину, що знаходиться у замкнених резервуарах, векторів розповсюдження потоків, енергетичних характеристик перемішувального при-

строю під час перемішування, процеси інтенсифікації масообміну та теплообміну у резервуарах.

У [14] наведено специфіку потоків при масообміні у резервуарах циліндричної форми при використанні механічних перемішувальних пристроїв. Під час роботи перемішувальних пристроїв з обертальним рухом виникає складний рух речовини – тангенціальний, радіальний та осьовий [14]. При цьому, доведено що процес перемішування рідкої фази органічних відходів відбувається за рахунок створення вихорів, котрі виникають на кромках лопатей механічних мішалок [15].

Оскільки, енергетична ефективність біогазового виробництва залежить від величини енергетичних витрат на перемішування, а згідно з [4], [12], [16], [17] на енергетичні витрати перемішувального пристрою мають суттєвий вплив його геометричні розміри та враховуючи завдання перемішування органічних відходів [3], [8], тому з метою створення системи перемішування органічних відходів необхідно використовувати механічну мішалку з найбільшим раціональним поєднанням площі проекції на речовину, що перемішується та споживаної енергії на процес перемішування.

Опираючись на інформацію наведену у [3], [4], [9]-[12], [14], [16], [18]-[21] найбільш часто у реакторах використовують механічні мішалки, а саме: якорні, рамні та лопатеві різних модифікацій.

Велика кількість вітчизняних та зарубіжних науковців займається питанням підвищення енергоефективності процесів анаеробного зброджування органічних відходів у біогазових реакторах. Проводять дослідження перемішувальних пристроїв з метою зниження енергетичного споживання на процес перемішування, встановлення розповсюдження векторів потоків для різних типів мішалок. У [17] наведено дослідження впливу типів мішалок на турбулентні потоки створені у реакторах. У [17], [22] наведено результати досліджень у яких сказано, що перемішування у середині воронки турбулентного потоку відсутнє. Таким чином, створення турбулентних потоків у замкнених резервуарах з погляду ефективності перемішування речовини у замкнених резервуарах є недоцільним.

Незважаючи на існуючі результати проведених досліджень питання визначення енергоефективного типу перемішувального пристрою з метою підвищення енергетичної ефективності процесу утворення біогазу є не повністю вирішеним та наразі залишається актуальним.

## III. МЕТА РОБОТИ

Дослідження залежності енергетичних витрат механічних мішалок та визначення енергоефективного типу перемішувального пристрою для підвищення енергетичної ефективності процесу утворення біогазу та рентабельності подальшої переробки у теплову та електричну енергію.

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

З метою дослідження залежності енергетичних витрат та визначення енергоефективного типу перемішуючого пристрою, проведено порівняльний аналіз енергетичних витрат для тихохідних механічних мішалок, при заданих наступних початкових умовах: фізико-хімічні параметри органічної біомаси завантаженої у біогазовий реактор  $\rho = 1024 \text{ кг/м}^3$ ,  $\mu = 0.048 \text{ Па} \cdot \text{с}$  [23]. Біогазові реактори циліндричної форми з наступними геометричними параметрами: об'єм реактора  $V_{\text{reak}} = 5 \text{ м}^3$ , висота органічної біомаси у реакторі  $H = 2 \text{ м}$ , діаметр реактора  $D = 1.8 \text{ м}$ . Висота від дна реактора до нижньої частини лопаті механічної мішалки  $s = 0.3 \text{ м}$ ; діаметр мішалки  $d_m = 1.5 \text{ м}$ ; висота лопатей  $h = 0.2 \text{ м}$ ; коефіцієнт запасу потужності електричного двигуна  $K_{\text{зан}} = 1.3$ ; коефіцієнт корисної дії передачі  $\eta_n = 0.8$ ; коефіцієнт корисної дії електричного двигуна  $\eta_{\text{дв}} = 0.8$ .

На споживану потужність механічного перемішуючого пристрою суттєвий вплив має режим руху речовини, що перемішується у замкненому резервуарі. Оцінка режиму руху речовини, що перемішується виконується на основі безрозмірної комплексної величини – відцентрового критерію Рейнольдса, для перемішування, який розраховується за рівнянням [3], [24], [25]:

$$Re_m = \frac{\rho \cdot n_c \cdot d_m^2}{\mu}; \quad (1)$$

де  $Re_m$  – модифікований критерій Рейнольдса для перемішування;  $\rho$  – густина біомаси,  $\text{кг/м}^3$ ;  $n_c$  – частота обертів мішалки,  $\text{об/с}$ ;  $\mu$  – динамічна в'язкість біомаси,  $\text{Па} \cdot \text{с}$ .

У [11], [17], [21] наведено результати досліджень, які вказують на ефективність обережного перемішування органічних відходів у біогазовому реакторі. Таким чином, обережне перемішування з використанням механічних мішалок забезпечує збереження цілісності колоній бактерій, тому у розрахунках число обертів механічних мішалок приймаємо  $n = 60 \text{ об/хв}$ .

Критерій Рейнольдса використовується для знаходження критерію гідродинамічної подоби Ейлера для механічних мішалок:

$$Eu_m = A / Re_m^m; \quad (2)$$

де  $A$  та  $m$  – встановлені експериментальним шляхом константи для різних типів мішалок.

У літературі [25] наведено експериментальні дані залежності критерію Ейлера від критерію Рейнольдса у вигляді кривих  $Eu_m = f(Re_m)$ , або у вигляді констант  $A$  та  $m$  для різноманітних конструкцій механічних мішалок. Константи для знаходження числа Ейлера для мішалок: шестилопатевої, лопаті під кутом  $90^\circ$   $A = 12.5$ ;  $m = 0.25$ ; якірної та рамної  $A = 6.2$ ;  $m = 0.25$ ; лопатевої двоярусної, по дві лопаті на ярус, під кутом  $90^\circ$   $A = 13.6$ ;  $m = 0.2$ .

У випадку коли спроектована мішалка відрізняється геометричними співвідношеннями від модельної мішалки, для якої встановлено значення констант  $A$  та  $m$ , тоді розрахований за формулою (2) критерій Ейлера повинен включати поправочні коефіцієнти  $f_i$ . Поправочні коефіцієнти для кожного типу мішалки розраховуються за рівняннями [24]:

$$f_1 = \left( \frac{D}{\alpha \cdot d_m} \right)^a; \quad f_2 = \left( \frac{H}{D} \right)^c; \quad f_3 = \left( \frac{h}{\beta \cdot d_m} \right)^e;$$

$$f_4 = \left( \frac{s}{d_m} \right)^r; \quad f_5 = 1.2 \dots 1.5;$$

де  $\alpha$  – відношення  $D/d_m$  для модельної мішалки;  $\beta$  – відношення  $h/d_m$  для модельної мішалки;  $D$  – діаметр резервуару,  $m$ ;  $H$  – висота шару речовини у резервуарі,  $m$ ;  $h$  – висота лопаті,  $m$ ;  $s$  – відстань від нижньої частини лопаті до дна резервуару,  $m$ ;  $a, c, e, r$  – постійні величини;  $f_1$  – поправочний коефіцієнт діаметру резервуару до діаметру мішалки;  $f_2$  – поправочний коефіцієнт висоти шару речовини у резервуарі;  $f_3$  – поправочний коефіцієнт відношення висоти лопаті до її діаметру мішалки;  $f_4$  – поправочний коефіцієнт, який враховує зміну відстані розташування спроектованої мішалки від дна резервуару від модельної;  $f_5$  – коефіцієнт шорсткості поверхонь лопаті та стінок резервуару. Постійні величини для лопатевої, якірної та рамної мішалок [24]:  $a = 1.1$ ;  $c = 0.6$ ;  $e = 0.3$ ;  $r = 0$ .

Критерій Ейлера з врахуванням поправочних коефіцієнтів для кожного типу тихохідної механічної мішалки розраховується за рівнянням:

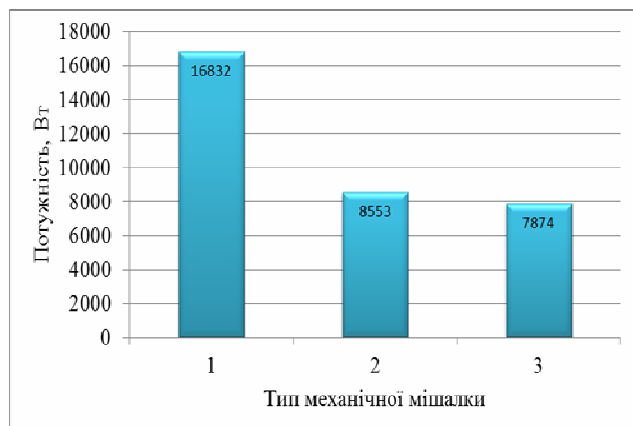
$$Eu'_m = Eu_m \cdot \sum(f_i); \quad (4)$$

Потужність електродвигуна вибирається за робочою потужністю мішалки ( $N_p$ ), при врахуванні коефіцієнту корисної дії передачі ( $\eta_n$ ) та коефіцієнту запасу потужності ( $k = 1.2 \dots 1.5$ ):

$$N_{\text{дв}} = k \frac{N_p}{\eta_n}; \quad (5)$$

$$N_p = Eu'_m \cdot n^3 \cdot d_m^5 \cdot \rho; \quad (6)$$

Результати проведеного порівняльного аналізу представлено у вигляді графічних залежностей на яких зображено необхідна витрата потужності для електричного приводу механічних мішалок, рис. 1.



**Рисунок 1.** Витрата потужності для електричного приводу механічної мішалки: 1 – Шестилопатева, лопаті під кутом  $90^{\circ}$ ; 2 – Якірна та рамна; 3 – Лопатева двоярусна, по дві лопаті на ярус під кутом  $90^{\circ}$

У ході проведення порівняльного аналізу, проведено розрахунок критерію Ейлера з врахуванням поправочних коефіцієнтів та отримано наступні результати для мішалок: шестилопатевої, лопаті під кутом  $90^{\circ}$   $Eu'_m = 1.24$ , якірної та рамної;  $Eu'_m = 0.63$ , лопатевої двоярусної, по дві лопаті на ярус під кутом  $90^{\circ}$   $Eu'_m = 0.58$ .

Отримані результати критерію Ейлера для механічних мішалок різної конструкції при однаковому об'ємі резервуару, режиму руху і рівня речовини у резервуарі та інших однакових параметрів – є різними. Це пояснюється тим, що форма механічної мішалки має суттєвий вплив на зміну картини потоків речовини у замкненому резервуарі, відповідно це призводить до збільшення гідравлічного опору обертання перемішуючого пристрою, і як наслідок, підвищенню енергетичних витрат на процес перемішування речовини, що у свою чергу знижує енергетичну ефективність процесу утворення біогазу і рентабельність подальшої його переробки у теплову та електричну енергію.

Проаналізувавши графічні залежності наведені на рис.1 та беручи до уваги розрахункові значення критерію Ейлера для розглянутих у роботі типів мішалок, встановлено, що серед розглянутих типів, використання двоярусної лопатевої мішалки у якій по дві лопаті на ярус, що встановлені під кутом  $90^{\circ}$  потребує найменшої кількості електричної енергії на перемішування органічної біомаси згідно з заданими початковими умовами.

## V. ВИСНОВКИ

Проведено порівняльний аналіз енергетичних витрат для найбільш розповсюджених у біогазових реакторах типів механічних мішалок. У результаті аналізу отримано графічні залежності необхідної витрати потужності для електричного приводу механічних мішалок та значення критерію Ейлера для розглянутих типів мішалок.

Встановлено, що збільшення значення критерію Ейлера призводить до підвищення енергетичних витрат на процес перемішування, що у свою чергу знижує енергетичну ефективність процесу утворення біогазу та рентабельність подальшої його переробки у теплову та електричну енергію.

Встановлено, що використання двоярусної лопатевої мішалки, у якій по дві лопаті на ярус, що встановлені під кутом  $90^{\circ}$  необхідно найменша кількість енергії на перемішування біомаси у біогазовому реакторі об'ємом  $V_{peak} = 5 \text{ м}^3$ , та геометричними розмірами згідно з початковими умовами.

Приведені дані можуть бути використані при будівництві та модернізації існуючих біогазових установок.

Враховуючи отримані результати, вважається доцільним провести теоретичні та експериментальні дослідження двоярусної лопатевої мішалки у якій по дві лопаті на ярус, для різних кутів нахилу лопаток. Дослідити вектори потоків, що створюються мішалкою для різних кутів нахилу лопатей. Це дозволить встановити оптимальні геометричні розміри мішалки та максимально підвищити енергетичну ефективність процесу утворення біогазу та рентабельності 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\\_gazy\\_90\\_07.pdf](http://climategroup.org.ua/upl/Nac_zvit_p_parn_gazy_90_07.pdf).
- [2] Нездойминов, В.И. Математическое описание основных факторов, влияющих на формирование взвешенного слоя осадка в илоотделителе [Текст]/ В.И. Нездойминов, В.И. Зятина, В.С. Рожков// Сучасне промислове та цивільне будівництво, 2016. – №2. – 51-58 с.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Marks, S., Jeżowska, 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*, 6, 24-26.
- [8] 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.: НУБіП, 2019.
- [9] 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.
- [10] Куріс, Ю.В. Біоенергетичні установки. Обладнання та технології переробки органомісних енергоресурсів [Текст]/ Ю.В. Куріс: монографія. – Запоріжжя: ЗДІА, 2012. – 348 с.
- [11] Веденев, А.Г., Веденева, Т.А. Руководство по биогазовым технологиям [Текст]. «ДЭМИ», 2011. – 84 с.
- [12] 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.* 99, 71-77.
- [13] Ameer, H. (2018). Modifications in the Rushton turbine for mixing viscoplastic fluids. *J. Food Eng.* 223, 117-125.
- [14] Закоморний, Д.М., Поводзинський, В.М., Шибельський, В.Ю. Класифікація та аналіз роботи ферментерів з механічними перемішувачами пристроями в аеробних процесах біотехнології. *ScienceRise*, 2015. – 5, №2, 24-32.
- [15] Барабаш, В.М. Проблемы и тенденции развития теории и практики перемешивания жидких сред [Текст]/ В.М. Барабаш, В.И. Бегичев, М.А. Бе-  
левицкая, Н.Н. Смирнов // Теоретические основы хим. технологии. – 2007. – 41, №2, 140-147 с.
- [16] Червоний, І.Ф., Куріс, Ю.В. Дослідження пристроїв та удосконалення процесів перемішування в біогазових установках. – Х.: Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит, 2012. – №2, 96.
- [17] Foukrach, M., Bouzit, M., Ameer, 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.
- [18] Стренк, Ф. Перемешивание и аппараты с мешалками [Текст]: Пер. с польск./Под ред. И.А. Щупляка. – Л.: Химия, 1975. – 384 с.
- [19] Луняка, К.В., Вус, Д.Н., Русанов, С.А., Клюев, О.И. Розчинення твердої речовини при перемішуванні мешалками в посудинах з вертикальними перегородками. «Теорія і практика сучасного природознавства». Збірник наукових праць. – Херсон: 2009. – 36-39 с.
- [20] Баранов, Д.А., Кутепов, А.М. Процессы и аппараты. Учебник для студ. учреждений сред. проф. образования [Текст]. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. – 304 с.
- [21] Луняка, К.В., Вус, Д.Н., Клюев, О.И., Николаенко, И.В. Получение зависимости для расчета времени растворения твердого вещества механической мешалкой// Вісник СумДУ. Серія Технічні науки. – 2009. – №3. – 191-195 с.
- [22] Луняка, К., Вус, Д., Чумаков, Г. Дослідження масопередачі при перемішуванні турбінною мешалкою в посудинах з відбивними перегородками// Вісник Тернопільського державного технічного університету, 2008. – 13, №1. – 171-176 с.
- [23] Юркова, В.В., Шкляр, В.И., Дубровская, В.В. Анализ энергоэффективности работы когенерационных установок на биотопливе. – К.: Научный журнал Киевского политехнического университета им. Игоря Сикорского «Энергетика, экономика, технологии, экология». – 2014. – №3. – 29-32 с.
- [24] Карпушкин, С.В. Расчет и выбор механических перемешивающих устройств вертикальных емкостных аппаратов [Текст]/ С.В. Карпушкин, М.Н. Краснянский, А.Б. Борисенко. – Тамбов, Издательство ТГТУ, 2009. – 168 с.
- [25] Черевко, О.І., Поперечний, А.М. Процеси і апарати харчових виробництв [Текст]/ О.І. Черевко, А.М. Поперечний: підручник — 2-е видання, доп. та випр. – Х.: Світ Книг, 2014. – 495 с.

Стаття надійшла до редакції 20.01.2021

## ЗАВИСИМОСТЬ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЗАТРАТ ОТ ТИПА ИСПОЛЬЗОВАННОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ МЕШАЛКИ В БИОГАЗОВОМ РЕАКТОРЕ

СПОДОБА М.А.

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

ЗАБЛОДСКИЙ Н.Н.

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

**Цель работы.** Исследование зависимости энергетических затрат механических мешалок и определения энергоэффективного типа перемешивающего устройства для повышения энергетической эффективности процесса образования биогаза и рентабельности дальнейшей переработки в тепловую и электрическую энергии.

**Методы исследования.** Определение и анализ энергетических затрат для механических мешалок, сравнения и определения их энергопотребления в процессе образования биогаза, 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 является долговременным, поэтому одним из основных методов интенсификации биогазового производства является перемешивание отходов в процессе анаэробного брожения. Несмотря на большое количество различных типов перемешивающих устройств и систем, основная задача перемешивания заключается в создании однородного вещества с одинаковой температурой, кислотностью и другими физико-химическими составляющими в любой точке объема вещества. Существует необходимость повышения энергоэффективности процессов интенсификации анаэробного сбраживания и рентабельности дальнейшей переработки биогаза в тепловую и электрическую энергию. Пути повышения энергоэффективности заключаются в определенных зависимостях энергетических затрат механических мешалок, выборе энергоэффективного типа мешалки, определенных критериев, которые существенно влияют на потребление электрической энергии на перемешивание, исследовании векторов распространения потоков, создаваемых мешалкой. Реализация этих действий позволит установить оптимальные геометрические размеры мешалки и существенно повысить энергетическую эффективность биогазовых установок и дальнейшую переработку образовавшегося биогаза в тепловую и электрическую энергию.

**Научная новизна.** Проведен анализ причин различных значений критерия Эйлера для механических мешалок при одинаковом режиме движения вещества ее уровня и объема в резервуаре и прочих равных параметрах. Проведен сравнительный анализ энергетических затрат для наиболее распространенных в биогазовых реакторах типов механических мешалок. Установлено, что использование двухъярусной лопастной мешалки, в которой по две лопасти на ярус необходимо наименьшее количество энергии на перемешивание отходов в биогазовых реакторе объемом  $V_{\text{реак}} = 5 \text{ м}^3$ .

**Практическая ценность.** Приведенные в работе данные могут быть использованы при проектировании, строительстве и модернизации биогазовых установок. Определено направление необходимых дальнейших научных исследований, реализация которых повысит энергетическую эффективность биогазового производства и рентабельность дальнейшей переработки биогаза в тепловую и электрическую энергию.

**Ключевые слова:** энергоэффективность; критерий Рейнольдса; критерий Эйлера; перемешивание; мощность электродвигателя; энергопотребление.

## DEPENDENCE OF ENERGY CONSUMPTIONS ON THE TYPE OF MECHANICAL MIXER USED IN THE BIOGAS REACTOR

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;

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;

**Purpose.** Investigation of the dependence of the energy consumption of mechanical mixers and determination of an energy-efficient type of mixing device to increase the energy efficiency of the biogas formation process and the profitability of further processing into thermal and electrical energy.

**Methodology.** Determination and analysis of energy costs for mechanical mixers, comparison and determination of their energy consumption in the process of biogas formation, generalization of the results.

**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 the processes of intensification of anaerobic fermentation. The process of anaerobic fermentation of waste is long, so one of the main methods of intensification of biogas production is the mixing of waste during anaerobic fermentation. Despite the large number of different types of mixing devices and systems, the main task of mixing is to create a homogeneous substance with the same temperature, acidity and other physicochemical components at any point in the volume of the substance. There is a need to increase the energy efficiency of the processes of intensification of anaerobic fermentation and the profitability of further processing of biogas into heat and electricity. Ways to improve energy efficiency are in certain dependences of the energy consumption of mechanical mixers, the choice of an energy-efficient type of mixer, certain criteria that significantly affect the consumption of electrical energy for mixing, the study of the vectors of propagation of flows created by the mixer. The implementation of these actions will allow you to establish the optimal geometric dimensions of the mixer and significantly increase the energy efficiency of biogas plants and further processing of the resulting biogas into thermal and electrical energy.

**Originality.** The analysis of the reasons for different values of the Euler criterion for mechanical mixers is carried out with the same mode of the substance motion, its level and volume in the tank and other equal parameters. A comparative analysis of energy costs for the most common types of mechanical mixers in biogas reactors is carried out. It has been established that the use of a two-tier paddle mixer, which has two blades per tier, requires the least amount of energy to mix waste in a biogas reactor with a volume  $V_r = 5 \text{ m}^3$ .

**Practical value.** The data presented in this paper can be used in the design, construction and modernization of biogas plants. The direction of necessary further scientific researches is determined, the realization of which will increase the energy efficiency of biogas production and the profitability of further processing of biogas into thermal and electric energy.

**Keywords:** energy efficiency; Reynolds criterion; Euler's criterion; mixing; electric motor power; energy consumption.

## REFERENCE

- [1] Bereznitskaya, M.V., Butrim, O.V., Panchenko, G.G. (2008) Natsionalnyy kadastr antropogennykh vybrosov iz istochnikov i absorbtzii poglotitelyami parnikovykh gazov v Ukraine za 1990–2007 gg. [Elektronnyy resurs]. – K.: Ministerstvo okhrany okruzhayushchey prirodnoy sredy Ukrainy, 319. Rezhim dostupa: [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). (in Ukrainian)
- [2] Nezdoyminov, V.I., Zyatina, V.I., Rozhkov, V.S. (2016) Matematicheskoye opisaniye osnovnykh faktorov. vliyayushchikh na formirovaniye vzvshennogo sloya osadka v ilootdelitele. Suchasne promisllove ta tsivilne budivnitstvo, 2, 51-58. (in Ukrainian)
- [3] Ratushnyak, G.S., Anokhina, K.V., Dzhezhula, V.V. (2010) Doslidzhennya parametriv protsesu peremishuvannya organichnoi masi v biogazoviyi ustanovtsi z vertikalnim propelernim peremishuvachem. Vinnitsya: VNTU, 170. (in Ukrainian)
- [4] 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.
- [5] Trakhunova, I.A., Karayeva, Yu.V. (2012) Effektivnost gidravlicheskogo peremeshivaniya pri razlichnykh sposobakh zagruzki organicheskogo substrata v reaktor BGU. Molodoy uchenyy, 4, 45-50. (in Russian)
- [6] 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.
- [7] Marks S., Jeżowska 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, 6, 24-26.
- [8] Spodoba, M.O., Zablodskiy, N.N., Radko, I.P. (2019) Osnovni skladovi metodologii pobudovi zaglibnogo elektromekhanichnogo peretvoryuvacha



- dlya biogazovikh kompleksiv. V Mizhnarodna naukovopraktichna konferentsiya prisvyachena pam'yati profesora Viktora Mikhaylovicha Sinkova «Problemi ta perspektivi rozviku energetiki. elektrotekhnologiy ta avtomatiki v APK». K.: NUBiP. (in Ukrainian)
- [9] Ratushnyak, G.S., Lyalyuk, O.G., Koshcheev, I.A. (2017) Biogazovi ustanovki z vidnovlyuvanimi dzherelami energii termostabilizatsii protsesu fermentatsii biomasi. Vinnitsya: VNTU, 88. (in Ukrainian)
- [10] Kuris, Yu.V. Bioenergetichni ustanovki. Obladnannya ta tekhnologii pererobki organovmisnikh energoresursiv. Zaporizhzhya: ZDIA, 348. (in Ukrainian)
- [11] Vedenev, A.G., Vedeneva, T.A. (2011) Rukovodstvo po biogazovym tekhnologiyam. «DEMI», 84.
- [12] 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.* 99, 71-77.
- [13] Ameer, H. (2018). Modifications in the Rushton turbine for mixing viscoplastic fluids. *J. Food Eng.* 223, 117-125.
- [14] Zakomorniy, D.M., Povodzinskiy, V.M., Shibetskiy, V.Yu. (2015) Klasifikatsiya ta analiz roboti fermenteriv z mekhanichnimi peremishuyuchimi pristroyami v ayerobnikh protsesakh biotekhnologii. *ScienceRise*, 5 (2), 24-32. (in Ukrainian)
- [15] Barabash, V.M., Begichev, V.I., Belevitskaya, M.A., Smirnov, N.N. (2007) Problemy i tendentsii rozvitiya teorii i praktiki peremeshivaniya zhidkikh sred. *Teoreticheskiye osnovy khim. tekhnologii*. 41, (2), 140-147. (in Ukrainian)
- [16] Chervoniy, I.F., Kuris, Yu.V. (2012) Doslidzhennya pristroyiv ta udoskonalennya protsesiv peremishuvannya v biogazovikh ustanovkakh. *Kh.: Energoberezhennye. Energetika. Energoaudit*. 2, 96. (in Ukrainian)
- [17] Foukrach, M., Bouzit, M., Ameer, 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.
- [18] Strenk, F. (1975) *Peremeshivaniye i apparaty s mishalkami*. L.: Khimiya, 384. (in Russian)
- [19] Lunyaka, K.V., Vus, D.N., Rusanov, S.A., Klyuyev, O.I. (2009) *Rozchinennya tverdoi rezhovini pri peremishuvanni mishalkami v posudinakh z vertikalnimi peregorodkami*. Kherson, 36-39. (in Ukrainian)
- [20] Baranov, D.A., Kutepov, A.M. (2004) *Protsessy i apparaty*. Uchebnik dlya stud. uchrezhdeniy sred. prof. Obrazovaniya. M.: Izdatelskiy tsentr «Akademiya», 304. (in Ukrainian)
- [21] Lunyaka, K.V., Vus, D.N., Klyuyev, O.I., Nikolayenko, I.V. (2009) *Polucheniye zavisimosti dlya rascheta vremeni rastvoreniya tverdogo veshchestva mekhanicheskoy meshalkoy*. Sumy: Visnik SumDU. Seriya Tekhnichni nauki, 3, 191-195. (in Ukrainian)
- [22] Lunyaka, K., Vus, D., Chumakov, G. (2008) *Doslidzhennya masoperedachi pri peremishuvanni turbinnoyu mishalkoyu v posudinakh z vidbivnimi peregorodkami*. Ternopil: Visnik Ternopil'skogo derzhavnogo tekhnichnogo universitetu, 13, 1, 171-176. (in Ukrainian)
- [23] Yurkova, V.V., Shklyar, V.I., Dubrovskaya, V.V. (2014) *Analiz energoeffektivnosti raboty kogeneratsionnykh ustanovok na biotoplive*. K.: Nauchnyy zhurnal Kiyevskogo politekhnicheskogo universiteta im. Igorya Sikorskogo «Energetika. ekonomika. tekhnologii. ekologiya», 3, 29-32. (in Ukrainian)
- [24] Karpushkin, S.V., Krasnyanskiy, M.N., Borisenko, A.B. (2009) *Raschet i vybor mekhanicheskikh peremeshivayushchikh ustroystv vertikalnikh emkostnykh apparatov*. Tambov: Izdatelstvo TGTU, 168. (in Russian)
- [25] Cherevko, O.I., Poperechniy, A.M. (2014) *Protsesi i aparaty kharchovikh virobnitstv: pidruchnik 2-vidannya. dop. ta vipr.* Kh.: Svit Knig, 495. (in Ukrainian)

## ПРОБЛЕМИ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ ПОТУЖНИХ ЕНЕРГООБ'ЄДНАНЬ ПРИ МАСОВОМУ ПРИЄДНАННІ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ

- ПАПАЙКА Ю.А. д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри електроенергетики Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна, e-mail: paraika@ukr.net;
- ЛИСЕНКО О.Г. канд. техн. наук, доцент кафедри електроприводу Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна, e-mail: lysenkoag@ukr.net;
- БУБЛІКОВ А.В. д-р техн. наук, професор кафедри кіберфізичних та інформаційно-вимірвальних систем Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна, e-mail: bublikov.a.v@nmu.one;
- ОЛІШЕВСЬКИЙ І.Г. асистент кафедри безпеки інформації та телекомунікацій Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна, e-mail: olishevskiyi@ukr.net;

**Мета роботи.** Проведення аналізу проблеми енергетичної ефективності та електромагнітної сумісності потужних енергооб'єднань з нелінійними навантаженнями та відновлювальними джерелами електроенергії. Знаходження перспективних шляхів підвищення енергетичної ефективності систем електропостачання.

**Методи дослідження.** Математичне моделювання електромагнітної сумісності.

**Отримані результати.** Проведений аналіз проблеми енергетичної ефективності та електромагнітної сумісності потужних енергооб'єднань з нелінійними навантаженнями та відновлювальними джерелами енергії дозволяє сформулювати наступні положення, що обумовлюють задачі цього дослідження. Перспективним шляхом підвищення енергетичної ефективності систем електропостачання є впровадження уточнених методик аналізу та прогнозування електричних режимів промислових підприємств, а також показників якості напруги та надійності електрообладнання.

**Наукова новизна.** Незважаючи на те, що задачі електромагнітної сумісності були предметом численних вітчизняних і зарубіжних досліджень, слід зазначити, що більшість таких робіт розглядають процеси генерації електромагнітних перешкод в електричну мережу без зав'язків з технологічними графіками роботи електрообладнання.

**Практична цінність.** Одним з електромагнітних ефектів, який проявляється при роботі перетворювачів частоти, є значні рівні інтергармонік та вищих гармонік, що генеруються в електричну мережу та сприяють зростанню втрат електроенергії та скороченню регламентного строку служби електрообладнання. Проте закономірності, що зв'язують параметри енергосистеми та режими потужних промислових перетворювачів, не вивчалися, і обґрунтування параметрів раціонального енергетично ефективного режиму системи електропостачання при врахуванні індивідуальних графіків вищих гармонік до сьогоднішнього дня не проводилося.

**Ключові слова:** електромагнітна сумісність; моделювання; якість електричної енергії; відновлювальні джерела енергії; інверторне обладнання.

### І. ВСТУП

Надзвичайно важливою проблемою нормального функціонування енергосистеми України є енергетична ефективність передачі та споживання електроенергії, а також зниження кінцевого споживання електроенергії усіма об'єктами народного господарства [1]. Враховуючи надзвичайно швидкий темп зростання кількості перетворювачів різних типів в електричних мережах актуальною стає проблема електромагнітної сумісності та якості електроенергії (ЯЕ). Найбільш повно її ілюструє економічний аспект. За експертними оцінками щорічний економічний збиток для світової енергетики, обумовлений низькою якістю електроенергії, складає близько 500 млрд. дол./рік [2], [3],

за рахунок негативного впливу, головним чином, вищих гармонік, а також несиметрії і коливань напруги. В Україні, за даними 2017 року, щорічний збиток складає 5,1 млрд. дол. [2], [3].

Діапазони змін показників якості електроенергії на підприємствах різних галузей зазвичай великі і в багатьох випадках виходять за межі допустимих за нормами відповідних стандартів, наприклад, ГОСТ 13109-97 [4]. Зростання потужності нелінійних, несиметричних і різкозмінних навантажень, навіть в електричних мережах розвинених країн, випереджає впровадження заходів по мінімізації електромагнітних перешкод, що генеруються в мережу живлення [5]-[7].

Сумарна встановлена потужність керованих ти-

ристорних перетворювачів на листових і сортових прокатних станах досягає 1000 МВт, на алюмінієвих комбінатах - понад 1000 МВт, на гірничих підприємствах одинична потужність високовольтних перетворювачів досягає 5 МВт [8], [9]. Споруджуються електродугові сталеплавильні печі, що мають пічні трансформатори потужністю до 200 МВА [10]. Навіть ці приклади свідчать про масштаби джерел електромагнітних перешкод.

## II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

Як відомо, економічний збиток, пов'язаний з низькою якістю електроенергії, має електромагнітну та технологічну складові [11], [12]. Електромагнітна складова визначається збільшенням втрат активної потужності і скороченням терміну служби ізоляції електрообладнання [7]. Технологічна складова збитку виникає під впливом ЯЕ на продуктивність технологічних установок і собівартість продукції, що випускається, а також при частковій або повній зупинці виробництва.

Збільшення втрат електроенергії за рахунок її низької якості може досягати 15-20% [13]. Значення відносних втрат електроенергії в електричних мережах промислово розвинених країн за усередненими даними за 2013-2017 рр. знаходяться в межах 4-7%. Так, в Німеччині - 4%, у Франції-7, в Австрії, Бельгії, Чехії - 5, США -6, Італії, Швейцарії та Японії - 7% [13]. Ці країни мають високе значення внутрішнього валового продукту (ВВП) за паритету купівельної спроможності (ПКС) на душу населення, що перевищує 20 тис.дол.: США - 54,5 тис.дол, Австрія і Німеччина-46,5, Італія - 35,4, Франція - 40,7 тис.дол. Це дозволяє виділити зв'язок між відносними втратами електроенергії та рівнем життя населення в певній країні [13].

Високий рівень втрат в електричних мережах пов'язаний з низьким рівнем компенсації реактивної потужності, фізичним і моральним зносом мережі, недостатнім використанням засобів оптимізації режимів роботи і регулювання напруги і проблемною якістю електричної енергії [13], [25].

Низький рівень якості електричної енергії призводить до зниження енергетичної ефективності електричних мереж за рахунок збільшення втрат активної та реактивної потужностей, технологічних витрат електроенергії на її транспорт, до зниження терміну служби електрообладнання, збільшення капітальних вкладень в електричні мережі, порушення умов нор-

мального функціонування енергетичної системи [14].

Враховуючи, що жодних корекцій та поправок до методик визначення втрат електроенергії при зростанні частки нелінійного навантаження не було введено в нормативні документи, одне з першочергових завдань забезпечення енергетичної ефективності функціонування систем електропостачання є моделювання адекватних значень втрат потужності та енергії в електричних мережах при невизначеності початкових умов та довільних комбінаціях складу навантаження [14].

## III. МЕТА РОБОТИ

Проведення аналізу проблеми енергетичної ефективності та електромагнітної сумісності потужних энергооб'єднань з нелінійними навантаженнями та відновлювальними джерелами електроенергії. Знаходження перспективних шляхів підвищення енергетичної ефективності систем електропостачання.

## IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ ТА АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Електромагнітна сумісність відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). У ряді країн обсяги введення ВДЕ вже сьогодні значно перевищують обсяги введення джерел традиційної генерації.

Якщо в 2015 р загальна частка ВДЕ в генерації електроенергії в світі становила лише 5%, то в 2030 році вона становитиме 18,6%, а до 2050 р збільшиться до 48% [16]. Таким чином, зміна загальної частки ВДЕ в генерації електроенергії в 2050 році збільшиться в 8,6 разів. При цьому генерація сонячних електростанцій зросте в 30 разів, при середньорічному темпі зростання 10,2%, а генерація вітряних електростанцій збільшиться в 11 раз при середньорічному темпі зростання 7,1% [16].

Сонячна генерація не створює коливань потужності в енергосистемі, але надлишок її протягом періодів максимальної сонячної активності викликає додаткові складності навіть для нормального режиму роботи енергосистеми. Ця нерегульована та складно прогнозована генерація повинна покриватися класичними джерелами енергії або іншими спеціальними пристроями для забезпечення балансів потужності в енергосистемі. Аналізуючи роботи закордонних вчених [17]-[20], визначено проблему різкозмінного навантаження за реактивною потужністю та коефіцієнтом викривлення синусоїдальності (рис. 1-2).

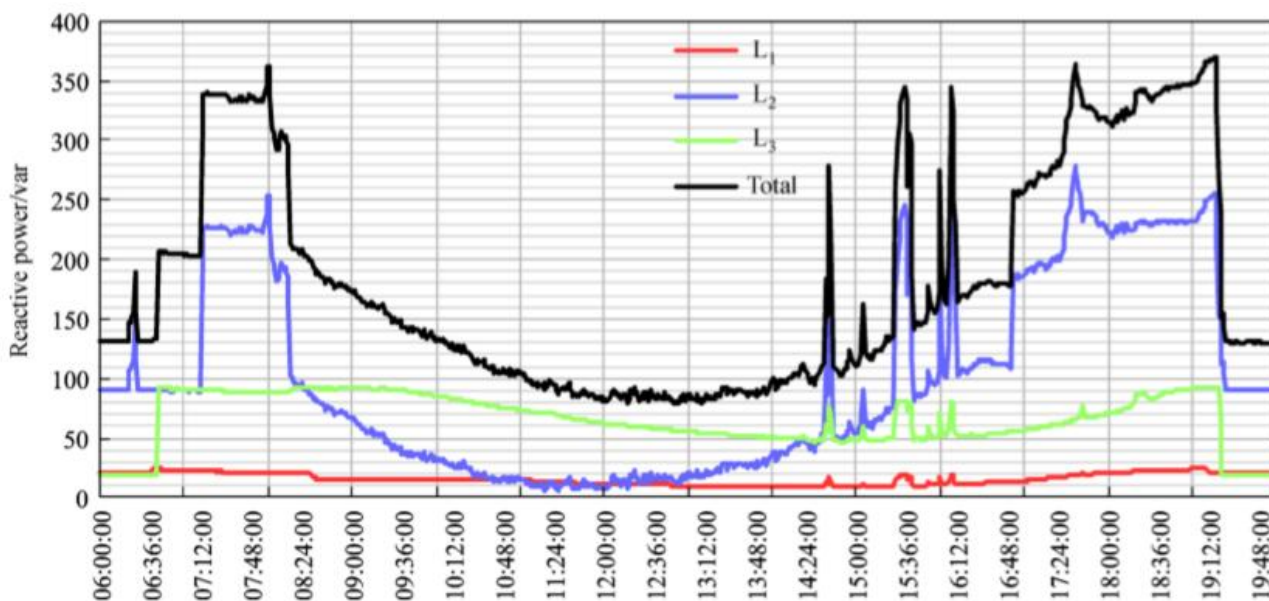


Рисунок 1. Денний графік реактивної потужності сонячної електростанції

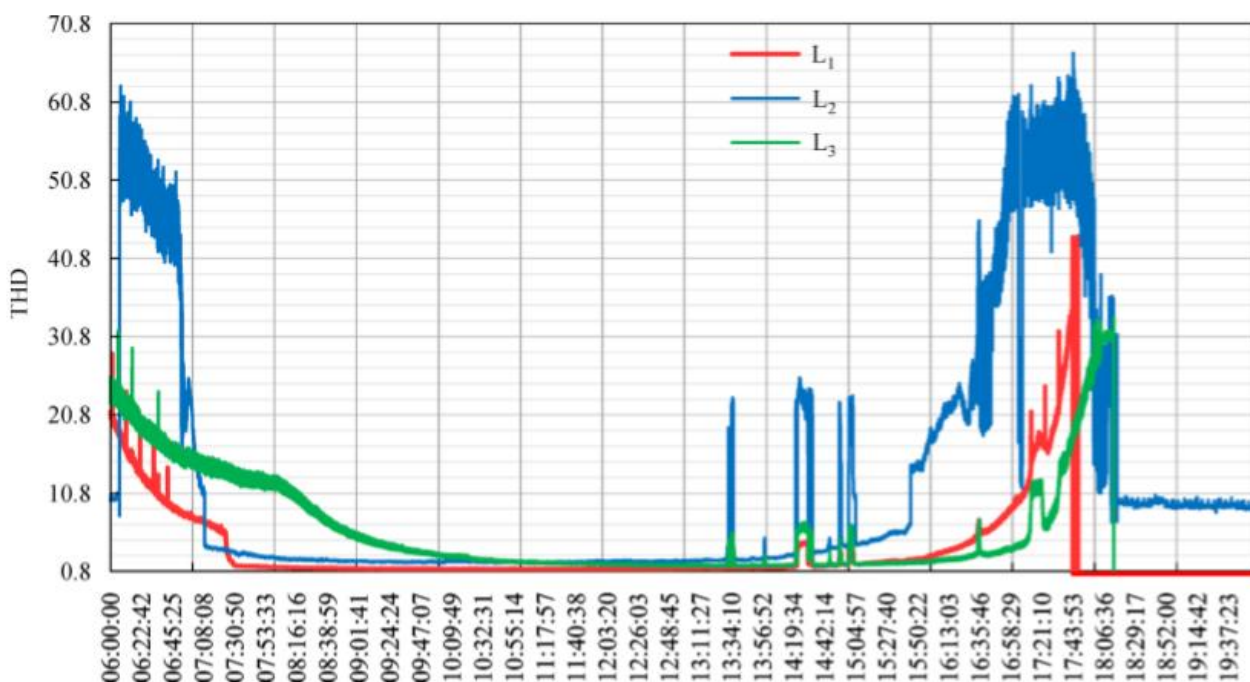


Рисунок 2. Денний графік коефіцієнта викривлення синусоїдальності сонячного інвертора

Більш складну ситуацію створює вітрова генерація. Вітроелектростанції є одним з найбільш використовуваних відновлюваних джерел. Однією з головних проблем використання енергії вітру є нестабільна генерація потужності, що постійно змінюється в залежності від сили вітру. Це призводить до непередбачуваних і нерегульованих змін потужності вітроагрегату і до нестаціонарного характеру генерації електроенергії, що впливає на надійність і ефективність

функціонування енергосистеми і створює значні складності для забезпечення її режиму [20]. Стохастичний характер видачі активної потужності вітроелектростанціями викликає коливання частоти в енергосистемі, зміни їх амплітуди і швидкості. Виникає також проблема впливу вітроелектростанції на ЯЕ в енергосистемі і приєднаних до неї споживачів, що також призводить до появи флікера, коливань та провалів напруги (рис. 3) [20].

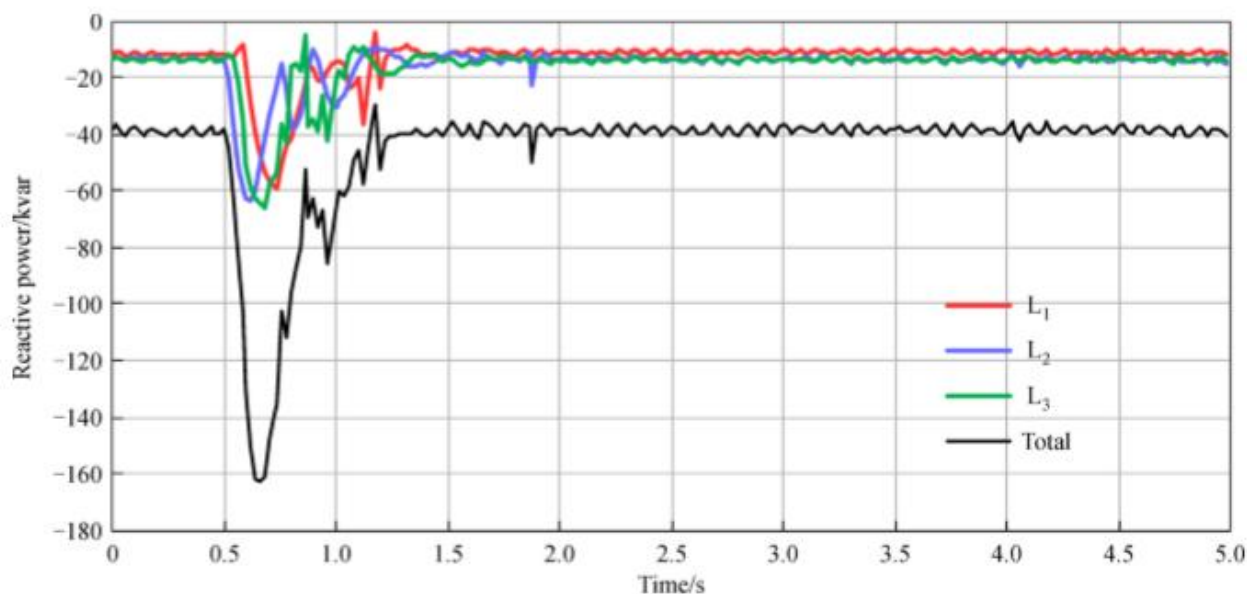


Рисунок 3. Несиметричний по фазам перехідний процес реактивної потужності при роботі вітроагрегату

Крім того розгойдування вітроелектростанцій при зміні швидкості вітру призводить до низькочастотних коливань і створює нові проблеми для стабільності енергосистеми і динамічної стійкості [20].

Зміна складу генерації, пов'язаних з впровадженням ВДЕ призводить до зменшення сталих інерції елементів систем електропостачання, збільшує чутливість параметрів режиму до малих збурень. В результаті енергосистема набуває нових властивостей, в тому числі і негативних, які проявляються, зокрема, в виникненні низькочастотних коливань її режимних параметрів. Експертними оцінками встановлено, що ситуація буде значно погіршуватися при поступовому переходу від централізованого електропостачання та обмеженні потужності енергосистеми [20].

Впровадження вітроелектростанцій призводить до додаткового (в порівнянні з традиційними джерелами електроенергії) зменшення інерційності енергосистеми і, як наслідок, до погіршення показників якості електроенергії (в першу чергу, провалів і флікер напруги).

Ця особливість в найбільшій мірі характерна для потужних промислових підприємств. Як свідчить досвід, раціональний діапазон значень потужності короткого замикання становить: в мережах 6-35 кВ – 150...1500 МВА, в мережах 110-220 кВ – 5000...10000 МВА. При зменшенні потужності короткого замикання у вузлі навантаження виникає необхідність уточнення теоретичних основ координації струмів короткого замикання та налаштування систем захисту [13].

Процес адаптації вітчизняної електроенергетики до стандартів країн Євросоюзу є складним. Важливо, що для успішної адаптації недостатньо виконати тех-

нічне переоснащення розподільчих та магістральних електричних мереж. Необхідні зміни в нормативно-правових документах та методиках забезпечення надійного та якісного електропостачання [21]. Вирішення проблеми якості електроенергії полягає у дослідженні режимів роботи так званих «проблемних» приймачів електричної енергії для подальшої розробки рекомендацій по забезпеченні режиму, сумісного з електричною мережею за певними параметрами. Для підприємств гірничо-видобувного профілю такі дослідження необхідно провести першочергово, враховуючи високі значення встановленої потужності споживачів та їх відповідальність.

Розглядаючи електромагнітну сумісність як показник якості продукції, необхідно на різних етапах її створення дотримуватися цілого ряду рекомендацій і норм, що охоплюють комплекс системних рішень [22].

Таким чином, при дослідженні проблеми економічності та електромагнітної сумісності систем електропостачання гірничих підприємств, визначено комплексне поняття «енергетична ефективність», яке об'єднує вимоги до якості та надійності електропостачання при формуванні спеціальних режимів споживання електроенергії з раціональним перетоком реактивної потужності та врахуванні обмеження потужності енергосистеми [22].

#### Вплив показників якості напруги на енергетичну ефективність систем електропостачання

Енергетична ефективність процесів передачі та споживання електроенергії оцінюється комплексними показниками, в основі яких покладено принцип мінімізації кінцевого споживання електроенергії. Так, при зниженні якості електричної енергії виникають додаткові втрати електроенергії та порушується нормаль-

на робота технологічного обладнання [22].

Оцінка негативного впливу процесів погіршення якості напруги в системах електропостачання гірничих підприємств має важливе значення для пошуку заходів підвищення енергоефективності та вибору параметрів корегуючих пристроїв [22].

#### **Відхилення напруги**

Головна причина відхилень напруги в СЕП гірничих підприємств – зміна навантажень, що викликається перш за все [22]:

- режимом роботи споживачів електроенергії;
- зміною числа підключених споживачів;
- оперативними перемиканнями;
- порушеннями роботи мережі.

Значення відхилення  $\delta U_t$  напруги в даному пункті мережі є функцією багатьох змінних:

$$\delta U_t = f(U_s, P, Q, Z, Y, \sum \delta U^d),$$

де  $P$  і  $Q$  – споживана активна та реактивна потужність в розглянутій мережі;

$U_s$  – напруга мережі живлення;

$Z$  і  $Y$  – опір і провідність елементів мережі живлення за різних варіантів електричних схем;

$\sum \delta U^d$  – сума «добавок» (додаткових значень напруги, наприклад, у трансформаторі або трансформаторах мережі живлення).

**Несиметрія напруг** у СЕП обумовлена наявністю потужних однофазних навантажень (індукційних плавильних і нагрівальних печей, зварювальних агрегатів, печей електрошлакового переплаву), а також трифазних, що тривалий час працюють в несиметричному режимі (наприклад, ДСП). Трифазна система напруг може бути несиметричною при живленні мережі підприємства від тягової підстанції змінного струму [22].

При несиметрії напруг у **трифазних мережах** з'являються додаткові втрати в елементах електромереж, скорочується термін служби електрообладнання, зменшуються економічні показники його роботи [22].

В **електричних машинах змінного струму** виникають магнітні поля, що обертаються з синхронною швидкістю в напрямку обертання ротора і з подвійною синхронною швидкістю – у протилежному. В результаті виникає гальмівний електромагнітний момент, а також додатковий нагрів активних частин машини, головним чином ротора, за рахунок струмів подвійної частоти [23].

В **асинхронних двигунах** (АД) при коефіцієнтах зворотної послідовності напруг, що зустрічаються на практиці ( $K_{2U} < 0,05 - 0,06$ ), зниження обертового моменту АД виявляється дуже незначним [22]. Вплив несиметрії на втрати в електродвигуні більшою мірою

супроводжується скороченням терміну служби ізоляції [23].

При несиметрії напруг мережі в **синхронних двигунах** (СД) поряд з виникненням додаткових втрат, нагріванням статора і ротора можуть виникнути небезпечні вібрації в результаті появи знакозмінних обертаючих моментів і тангенціальних сил [23].

При значній несиметрії вібрація може виявитися небезпечною, особливо при недостатній міцності або наявності дефектів зварних з'єднань. При несиметрії струмів, що не перевищує 30 %, небезпечні перенапруження в елементах конструкцій, як правило, не виникають.

Додаткові втрати потужності в СД при несиметричному навантаженні викликають появу місцевих (локальних) нагрівів обмотки збудження, що призводить до необхідності знижувати струм збудження і тим самим зменшувати значення реактивної потужності (РП), яка видається в мережу. При цьому може виникнути необхідність знизити активне навантаження генератора або момент на валу СД [23].

**Коливання напруги**, що виникають при роботі шахтних підйомних машин, негативно позначаються на зоровому сприйнятті предметів, деталей, графічних зображень і, в кінцевому рахунку, на продуктивності праці й зорі працівників. Подразником зорового аналізатора є світлова енергія. Процеси, що відбуваються в зоровому аналізаторі біологічної системи, як і всі процеси в природі, мають енергетичний сенс. Процес зорового сприйняття носить енергетичний характер. Рівні коливань напруги досліджувались під час комплексного моніторингу показників якості напруги в системах електропостачання ДТЕК «Павлоградугілля» та було показано, що доза флікера знаходиться в межах, допустимих нормативними документами [22].

При наявності вищих гармонік в СЕП з'являються додаткові втрати в електричних машинах, трансформаторах і мережах [22], ускладнюється компенсація реактивної потужності (КРП) за допомогою БК [23]; скорочується термін служби ізоляції електричних машин і апаратів [75]; погіршується робота пристроїв автоматики, телемеханіки і зв'язку, мають місце й інші негативні наслідки [23].

При роботі асинхронних двигунів в умовах не-синусоїдальної напруги їх коефіцієнт потужності та обертовий момент на валу знижуються [7]. Практично вплив вищих гармонік на коефіцієнт потужності АД можна не враховувати [7]. Аналогічно це стосується моментів, що створюють ВГ струму: вони не перевищують кількох десятків відсотка моменту, що існують при промисловій частоті [7].

Батарей конденсаторів можуть тривало працювати при перевантаженні їх струмами ВГ не більше ніж на 30 %; допустиме підвищення напруги становить 10 % [22]. Однак в цих умовах термін їх служби скорочується. У СЕП гірничих підприємств, як правило, БК можуть виявитися в режимі, близькому до резона-

несу струмів на частоті будь-якої з вищих гармонік або інтергармонік. Внаслідок перевантажень вони виходять з ладу [22].

Облік електроенергії при несинусоїдальних режимах пов'язаний із значними похибками [5]. Їх значення залежать від вимірювальної системи лічильника, його частотної характеристики, місця установки лічильника (на лінійному або нелінійному навантаженні) й інших факторів.

При вимірюванні потужності нелінійного навантаження  $P_{нл}$  мають місце два зустрічні потоки потужності: основні частоти  $P_1$  та ВГ  $\sum_{n=2}^{\infty} P_n$ . Нелінійне навантаження є джерелом ВГ, тому [7]

$$P_{нл} = P_1 - \sum_{n=2}^{\infty} \Delta P_n.$$

Відповідно для лінійного навантаження справедливо [7]

$$P_n = P_1 + \sum_{n=2}^{\infty} \Delta P_n.$$

Ці вирази легко перетворюються до вигляду:

$$P_{нл} = P_1(1 - \gamma_{сч}) \text{ та } P_n = P_1(1 + \gamma_{сч}),$$

де  $\gamma_{сч} = \sum_{n=2}^{\infty} \Delta P_n / P_1$  – сума похибок лічильника на частотах ВГ.

При  $n > 1$  частотна похибка індукційного лічильника негативна, тому  $\gamma_{сч} < 1$ . Останні вирази дозволяють зробити висновок, що при нелінійних навантаженнях відбувається переоблік електроенергії, при лінійних – недооблік [7].

**Результати впливу інтергармонік (міжгармонік).**

Струми інтергармонік викликають викривлення напруги залежно від амплітуди складових струму й опору системи електропостачання на відповідній частоті [3,22]. Чим більше гамма-частот складових струму, тим більше ризик виникнення небажаних резонансних явищ, що можуть збільшити викривлення напруги і призвести до перевантаження або порушення роботи обладнання споживача [22]. Найбільш поширеними **наслідками впливу** інтергармонік є [7]: тепловий ефект; низькочастотні коливання механічних систем; проблеми в роботі флуоресцентних ламп і електронного устаткування; створення перешкод сигналом захисту й управління в проводах електричної мережі; перевантаження пасивних фільтрів ВГ; перешкоди для телекомунікацій; акустичний вплив; насичення вимірювальних трансформаторів.

**Провали напруги (ПН)** часто призводять до перерв електропостачання і, відповідно, до виникнення

технологічного збитку [14]. ПН часто виникають в результаті відключень повітряних ліній і подальшого автоматичного повторного включення (однофазного чи іншого), а також в результаті включення потужних споживачів та інших причин, вони негативно впливають на роботу елементів систем управління і контролю, чутливих до перешкод. Вплив ПН в ряді випадків призводить не тільки до локальних аварійних ситуацій, а й до повної зупинки виробництва [3]. Особливу небезпеку ПН представляють для виробництв з використанням автоматичних роботизованих ліній (наприклад, в машинобудуванні).

Головними чинниками, що визначають вплив ПН на стійкість чутливих до перешкод пристроїв (тобто відсутність помилкового спрацьовування), є глибина провалу (в меншій мірі тривалість), склад навантаження мережі підприємства, а також рівень гармонік. Отже, нормувати необхідно допустиме значення комплекс цих параметрів [3], [14].

Компенсація реактивної потужності (КРП) в електричних мережах дозволяє за рахунок оптимізації завантаження окремих ліній і підстанцій нормалізувати рівні напруги в дефіцитних по реактивній потужності районах, зняти обмеження на відключення окремих ліній в зв'язку з ліквідацією аварій та виведення їх в ремонт або на реконструкцію [3], [14].

З огляду на порівняно високу економічну і енергетичну ефективність компенсації реактивної потужності, в промислово розвинених країнах їй приділяють велику увагу. Зокрема, у Франції, Швеції, Німеччині потужність конденсаторних установок становить 35% від активної пікової потужності, в США і Японії – близько 70%. В окремих енергокомпаніях США потужність встановлених компенсуючих пристроїв становить 100% від потужності генераторів [22]. При цьому в багатьох країнах спостерігається тенденція зменшення видачі генераторами електростанцій реактивної потужності за рахунок збільшення частки реактивної потужності, що виробляється конденсаторами [22].

Коефіцієнт реактивної потужності  $tg\varphi$  в режимі максимальних навантажень в США, Японії і більшості європейських країн в залежності від номінальної напруги мережі підтримується на рівні 0,2 - 0,4, що відповідає  $\cos\varphi = 0,98 - 0,92$ . В останні роки в багатьох енергосистемах США розподільні електричні мережі в режимі максимальних навантажень працюють з  $tg\varphi = 0$  [22].

Сьогодні в системах електропостачання гірничих підприємств та в електричних мережах України взагалі увага до проблеми КРП дещо знизилася. З іншого боку, з ряду об'єктивних причин значно зросли реактивні навантаження при істотному відставанні введів генеруючих активних потужностей і будівництва електричних мереж. Виникла велика кількість промислових енергорайонів, що характеризуються дефіцитами

реактивної потужності та працюють зі зниженими рівнями напруги в нормальних режимах [23]. До цих «проблемних» енергооб'єднань відносяться гірничо-видобувні регіони, де все частіше стали виникати труднощі з виводом обладнання в ремонт внаслідок аварійних відключень. При цьому відбувалося зниження напруги на 20-30% від номінальної на головних знижувальних підстанціях з наступним автоматичним розвантаженням мережі [23].

Ці приклади свідчать про необхідність значних обсягів робіт з підвищення рівня КРП в електричних мережах гірничих підприємств. Недостатня увага до питань КРП призводить до значного зростання відносних втрат електроенергії в електричних мережах [23].

Компенсація реактивної потужності як і раніше залишається одним з пріоритетних заходів в актуальній сьогодні програмі підвищення, ефективності процесу передачі і розподілу електричної енергії [23].

Сьогодні одночасно з методичною базою необхідно розробити нові принципи вибору компенсуючих пристроїв з урахуванням несинусоїдальності напруги для забезпечення електромагнітної сумісності з електричними мережами децентралізованого принципу побудови [23].

#### Особливості систем електропостачання та енергетичних балансів гірничих підприємств

Умови експлуатації систем електропостачання гірничих підприємств визначають як сукупність кліматичних та механічних чинників, що впливають на режими основного електрообладнання [24]. На підземних гірничих роботах з кліматичних чинників найбільше впливає вологість, температура, пил та корозійно-активні речовини [24]. Все це впливає на ізоляцію електрообладнання та знижує надійність його роботи.

Умови роботи гірничого обладнання сформували особливий клас електричних «гірничих» мереж, до яких не можуть бути застосовані стандартні підходи до проектування та моделювання електричних режимів при наявності нелінійних навантажень [24]. Для введення обґрунтованих допущень та початкових умов при математичному моделюванні врахуємо особливості даного класу електричних мереж [24]:

- високі вимоги до надійності системи електропостачання для шахт небезпечних за газом

та пилом;

- відокремлене живлення підземних споживачів;
- складність організації компенсації реактивної потужності в умовах нестабільності підземних виробок;
- велика протяжність силових кабельних ліній напругою 6-10 та 0,66-1,14 кВ;
- велика потужність стаціонарних установок (до 5 МВт);
- особливості технології підземного видобування вугілля, що призводить до циклічності роботи машин та механізмів з частими зупинками та холостим ходом;
- складність виконання норм якості напруги для поверхневих та підземних електроприймачів.

Дані чинники покладені в основу нових моделей розрахунку якості та надійності електропостачання гірничих підприємств для досягнення максимальної енергетичної ефективності.

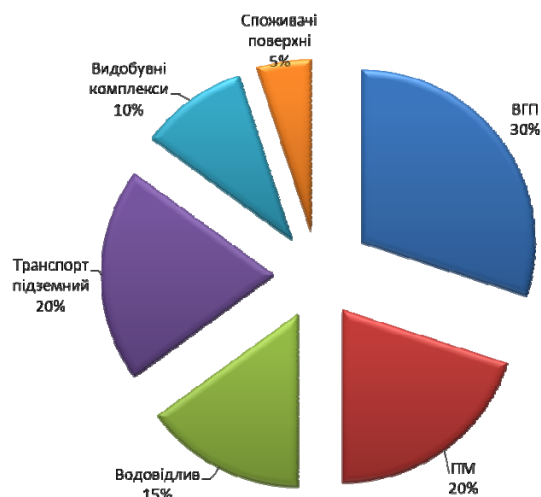


Рисунок 4. Енергетичний баланс вугільної шахти по технологічним ланкам



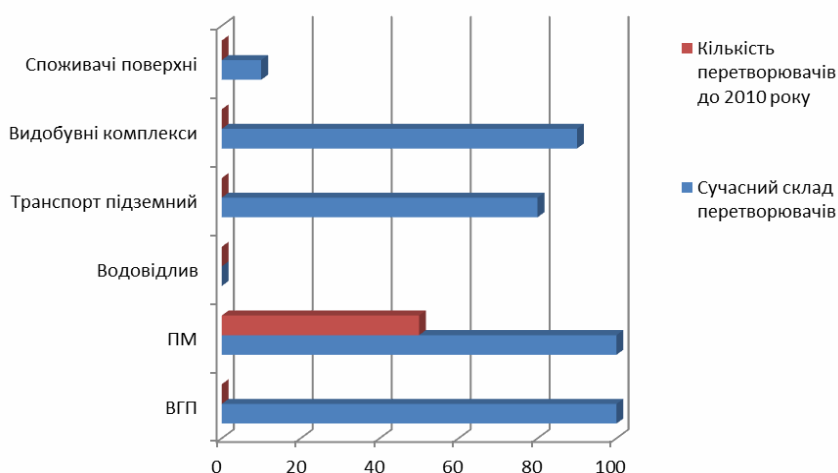


Рисунок 5. Динаміка зростання нелінійних навантажень в енергетичному балансі

Аналізуючи складові енергетичних балансів вугільних шахт по технологічним ланкам (рис. 4), було виявлено, що стаціонарні установки займають до 60% загальних витрат та формують режим споживання електроенергії за особливими повторно-короткочасними циклами [24]-[25].

Протягом останніх 10 років відбулось масштабне переоснащення технологічного електрообладнання на всіх виробничих ділянках гірничих підприємств з застосуванням перетворювачів частоти різних типів та потужностей. На рис. 5 демонструється динаміка зростання нелінійного навантаження в енергетичному балансі гірничих підприємств:

*Вентилятори головного провітрювання* - застосовуються асинхронні тиристорні каскади та перетворювачі частоти з ланкою постійного струму потужністю 1,6...5,0 МВт.

*Підйомні машини (вугільні та породні)* – в основному використовуються випрямлячі за 6 або 12 фазною схемою комутації вентилів потужністю 0,8...4,0 МВт.

*Витруєнні комплекси* – встановлена потужність електрообладнання 1 лави приблизно складає 1 МВт, при чому майже всі електродвигуни мають частотний привод.

*Транспорт підземний* – акумуляторні та безконтактні електровози, а також сучасні конвеєрні лінії комплектуються перетворювачами та майже повністю витіснили так званий «чистий» електропривод в підземних електричних мережах.

*Водовідлив* – на сьогоднішній день перетворювачі частоти не використовуються за технічних особливостей насосного обладнання.

Таким чином, існуючі методики проектування та аналізу електричних навантажень та режимів гірничих підприємств є застарілими та не відповідають сучасним умовам. Для забезпечення енергетичної

ефективності функціонування даного класу електричних мереж з нелінійними навантаженнями та значною часткою генерації ВДЕ необхідна розробка нових комплексних критеріїв якості та надійності електропостачання з урахуванням режимів перетворювачів.

## V. ВИСНОВКИ

Проведений аналіз проблеми енергетичної ефективності та електромагнітної сумісності потужних енергооб'єднань з нелінійними навантаженнями та ВДЕ дозволяє сформулювати наступні положення, що обумовлюють задачі цього дослідження. Перспективним шляхом підвищення енергетичної ефективності систем електропостачання є впровадження уточнених методик аналізу та прогнозування електричних режимів промислових підприємств, а також показників якості напруги та надійності електрообладнання.

Одним з електромагнітних ефектів, який проявляється при роботі перетворювачів частоти, є значні рівні інтергармонік та вищих гармонік, що генеруються в електричну мережу та сприяють зростанню втрат електроенергії та скороченню регламентного строку служби електрообладнання. Проте закономірності, що зв'язують параметри енергосистеми та режими потужних промислових перетворювачів, не вивчалися, і обґрунтування параметрів раціонального енергетично ефективного режиму системи електропостачання при врахуванні індивідуальних графіків вищих гармонік до сьогоднішнього дня не проводилося. З іншого боку, доцільно розглядати перетворювач частоти, як елемент системи електропостачання та формувати раціональні режими з урахуванням технологічних особливостей роботи та обмежень енергосистеми.

Незважаючи на те, що задачі електромагнітної сумісності були предметом численних вітчизняних і зарубіжних досліджень, слід зазначити, що більшість таких робіт розглядають процеси генерації електро-

магнітних перешкод в електричну мережу без зав'язків з технологічними графіками роботи електрообладнання. Існуючі методики розрахунку не дозволяють прогнозувати та регулювати зони виникнення резонансних явищ на частотах канонічних гармонік та інтергармонік, що унеможлиблює оптимальну компенсацію реактивної потужності.

Недостатня вивченість процесів електромагнітної сумісності потужних перетворювачів з особливим класом електричних мереж гірничих підприємств є одним із факторів, який обмежує впровадження інноваційних принципів інтелектуальної енергетики.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Аналітична доповідь до щорічного Послання Президента України до Верховної Ради України «Внутрішнє та зовнішнє становище України в 2016 році». - К.: НІСД, 2016. - 688 с.: С. 544- 546.
- [2] Жежеленко І.В. Електромагнітна сумісність у системах електропостачання: Підручник / І.В. Жежеленко, А.К. Шидловський, Г.Г. Півняк, Ю.Л. Саенко. – Д.: Нац. гірнич. ун-т, 2009. – 319 с.: іл.
- [3] Избранные вопросы несинусоидальных режимов в электрических сетях предприятий / И.В. Жежеленко, Ю.Л. Саенко, Т.К. Бараненко, А.В. Горпинич, В.В. Нестерович; Под ред. И.В. Жежеленко. – М.: Энергоатомиздат, 2007. – 296 с.
- [4] ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. - М.: Стандартинформ, 1997. - 60 с.
- [5] Гриб О.Г. Контроль потребления электроэнергии с учетом ее качества / О.Г. Гриб, В.И. Васильчиков, Ю.С. Громадский и др. Под ред. О.Г. Гриба. – Харьков: ХНУРЕ, 2010. – 300 с.
- [6] Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промышленных предприятий. – 5-е изд., перераб. и доп. / И.В. Жежеленко. – М.: Энергоатомиздат, 2004.
- [7] Жежеленко И.В. Электромагнитная совместимость в электрических сетях / И.В. Жежеленко, М.А. Коротчевич. – Минск: Высшая школа, 2012. – 197 с.
- [8] Papaika Y. Normalization of voltage quality as the way to ensure energy saving in power supply systems / G. Pivnyak, I. Zhezhelenko, Y. Papaika // CRC Press/Balkema – Taylor & Francis Group: Power Engineering Control and Information Technologies in Geotechnical Systems. – Leiden, The Netherlands, 2013 annual publication. – P. 11-18.
- [9] Папаїка Ю.А. Аналіз несинусоїдальності напруги в системі електропостачання ТОВ МЗ «Дніпросталь» при роботі потужної дугової сталеплавильної печі / Ю.А. Папаїка, О.В. Берковський // Гірнична електромеханіка та автоматика. – 2015. – № 94. – С. 17-20.
- [10] Гриб О. Г. / Анализ и оценка экономических ущербов от низкого качества электрической энергии : монография / В.А. Онищенко, И.А. Самойленко, О.Г. Гриб, А.Ф. Жаркин, В.И. Васильченко, К.В. Ущатовский, Г.А. Сендерович, А.Д. Светелик, К.И. Кондратенко, О.Н. Довгалюк, П.Г. Щербакова, Н.С. Захаренко ; под. общ. ред. проф. В.А. Онищенко. – Харьков : ХНУРЭ, 2013. – 328 с.
- [11] Жежеленко И.В. Оценка потерь электрической энергии, вызванных снижением ее качества / И.В. Жежеленко, В.В. Нестерович // Вісник Приазовського технічного університету: зб. наукових праць / ПДТУ. – Маріуполь, 2017. – Вип.34. – с.119-126.
- [12] Жежеленко И.В. Электрические потери от высших гармоник в системах электроснабжения / И.В. Жежеленко // Электрика. – 2010. - №4.
- [13] Папаїка Ю.А. Оцінка енергетичної ефективності систем електропостачання за допомогою індексу надійності / І.В. Жежеленко, Ю.А. Папаїка, О.Г. Лисенко // Гірнична електромеханіка та автоматика. – 2018. – № 100. – С. 25-30.
- [14] Папаїка Ю.А. Застосування індивідуальних графіків вищих гармонік в задачах електромагнітної сумісності та енергоефективності гірничих підприємств / І.В. Жежеленко, Ю.А. Папаїка, О.Г. Лисенко, К.С. Родна// Гірнична електромеханіка та автоматика. – 2019. – № 101. – С. 3-7.
- [15] Інтелектуальні електричні мережі: елементи та режими: за заг. ред. акад. НАН України О.В. Кириленка / Інститут електродинаміки НАН України. – К.: Ін-т електродинаміки НАН України, 2016. – 400 с.
- [16] Ущатовський К.В. Прогнози розвитку електроенергетики України: оцінка надійності та достовірності / К.В. Ущатовський // Енергосбереження. Енергетика. Енергоаудит. – 2015. - №7. С. 14-23.
- [17] Ryszard Strzelecki, Henryk Supronowicz. Wspolczynnik mocy w systemach zasilania pradu przemiennego i metody jego poprawy / Ryszard Strzelecki, Henryk Supronowicz, Warszawa: Oficyna Wydaw. Politechniki Warszawskiej, 2000, 452 s.
- [18] A. Ghosh and G. Ledwich, Power Quality Enhancement Using Custom Power Devices. Norwell, MA: Kluwer, 2002.
- [19] Janik P. Photovoltaic Power Generation Assessment Based on Advanced Signal Processing and Optimisation Techniques. Wroclaw: Publishing house of Wroclaw University of Science and Technology Wroclaw, 2014.
- [20] Janik P., Kosobudzki G., Schwarz. Influence of increasing numbers of RE-inverters on the power quality in the distribution grids: A PQ case study of a rep-

- representative wind turbine and photovoltaic system. Higher Education Press and Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017, DOI 10.1007/s11708-017-0469-3.
- [21] Жаркин А.Ф. Нормативно-правовое регулирование качества электрической энергии. Анализ украинских и европейских законодательных актов и нормативно-технических документов / А.Ф. Жаркин, В.А. Новский, С.А. Палачев. – К.: Ин-т электродинамики НАН Украины, 2010. – 167 с.
- [22] Папаика Ю.А. Энергетична ефективність систем електропостачання / Г.Г. Півняк, І.В. Жежеленко, Ю.А. Папаїка. – Д.: НТУ «ДП», 2018. – 149 с.
- [23] Электромагнитная совместимость потребителей: моногр. /И.В. Жежеленко, А.К. Шидловский, Г.Г. Пивняк, Ю.С. Саенко, Н.А. Нойбергер. – М.: Машиностроение, 2012. – 351 с.
- [24] Олишевский И. Г. Обоснование применения теплонасосного оборудования для утилизации тепловых потерь в силовых трансформаторах большой мощности / И. Г. Олишевский, Г. С. Олишевский // Вісник Дніпропетровського університету. Серія: Ракетно-космічна техніка. / Дніпр. нац. ун-т ім. О. Гончара. – Дніпропетровськ, 2015. – № 4. – Т. 23. – Вип. 18(1) – С. 131-136.
- [25] Півняк Г.Г. Електрифікація гірничих робіт / Г.Г. Півняк, М.М. Білий та ін. – Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2005. – 320 с.
- [26] Олишевский Г. С. Обоснование метода утилизации теплоты системы кондиционирования для теплонасосной системы отопления / Г. С. Олишевский, И. Г. Олишевский // Інформаційні системи, механіка та керування / НТУУ «Київський політехнічний інститут». – Київ. – 2017. – № 17. – С. 86 – 94.
- [27] Олишевский И. Г. Обоснование рациональной схемы теплонасосной системы отопления / И. Г. Олишевский // Механіка гіроскопічних систем / НТУУ «Київський політехнічний інститут». – Київ. – 2015. – № 30. – С. 26 – 35.
- [28] Papaika, Y., Lysenko, O., Koshelenko, Y. and Olisheskiyi, I., 2021. Mathematical modeling of power supply reliability at low voltage quality. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (2), pp.97-103.

Стаття надійшла до редакції 02.02.2021

## ПРОБЛЕМЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ МОЩНЫХ ЭНЕРГООБЪЕДИНЕНИЙ ПРИ МАССОВОМ ПОДКЛЮЧЕНИИ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

- ПАПАИКА Ю.А. д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой электроэнергетики НТУ «Днепропетровская политехника», Днепр, Украина, e-mail: papaika@ukr.net;
- ЛЫСЕНКО А. Г. канд техн. наук, доцент кафедры электропривода НТУ «Днепропетровская политехника», Днепр, Украина, e-mail: lysenkoag@ukr.net;
- БУБЛИКОВ А.В. д-р техн. наук, профессор кафедры киберфизических и информационно-измерительных систем НТУ «Днепропетровская политехника», Днепр, Украина, e-mail: bublikov.a.v@nmu.one.
- ОЛИШЕВСКИЙ И.Г. ассистент кафедры безопасности информации и телекоммуникаций НТУ «Днепропетровская политехника», Днепр, Украина, e-mail: olisheskiyi@ukr.net;

**Цель работы.** Проведение анализа проблемы энергетической эффективности и электромагнитной совместимости мощных энергообъединений с нелинейными нагрузками и возобновляемыми источниками энергии. Нахождение перспективных путей повышения энергетической эффективности систем электроснабжения.

**Методы исследования.** Математическое моделирование электромагнитной совместимости.

**Полученные результаты.** Проведенный анализ проблемы энергетической эффективности и электромагнитной совместимости мощных энергообъединений с нелинейными нагрузками и возобновляемыми источниками энергии позволяет сформулировать следующие положения, которые обуславливают задачи этого исследования. Перспективным путем повышения энергетической эффективности систем электроснабжения является внедрение уточненных методик анализа и прогнозирования электрических режимов промышленных предприятий, а также показателя качества напряжения и надежности электрооборудования.

**Научная новизна.** Несмотря на то, что задачи электромагнитной совместимости были предметом многочисленных отечественных и зарубежных исследований, следует отметить, что большинство таких работ рассматривают процессы генерации электромагнитных помех в электрическую сеть без связей с технологическими графиками работы электрооборудования.

**Практическая ценность.** Одним из электромагнитных эффектов, который проявляется при работе преобразователей частоты, имеются значительные уровни интергармоник и высших гармоник, генерируемых

в электрическую сеть и способствующих росту потерь электроэнергии и сокращению регламентного срока службы электрооборудования. Однако закономерности, связывающие параметры энергосистемы и режимы мощных промышленных преобразователей, не изучались, и обоснование параметров рационального энергетически эффективного режима системы электроснабжения при учете индивидуальных графиков высших гармоник до сегодняшнего дня не проводилось.

**Ключевые слова:** электромагнитная совместимость; моделирование; качество электрической энергии; возобновляемые источники энергии; инверторное оборудование.

## PROBLEMS OF ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY OF POWERFUL ENERGY ASSOCIATIONS DURING MASS CONNECTION OF RENEWABLE ENERGY SOURCES

- PAPAİKA YU. A. Sci.D, Professor, Head of the Department of Power Engineering, Dnipro University of technology, Dnipro, Ukraine, e-mail: papaika@ukr.net;
- LYSENKO O. H. PhD, docent of the Electric Drive department, Dnipro University of technology, Dnipro, Ukraine, e-mail: lysenkoag@ukr.net;
- BUBLIKOV A.V. Sci.D, Professor of the Department of Cyberphysical and Information-measuring Systems, Dnipro University of technology, Dnipro, Ukraine, e-mail: bublikov.a.v@nmu.one
- OLISHEVSKYI I. H. Assistant of Department of Information Security and Telecommunications, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine, e-mail: olishevskiyi@ukr.net,

**Purpose.** Analysis of the problem of energy efficiency and electromagnetic compatibility of powerful energy associations with nonlinear loads and renewable energy sources. Finding promising ways to increase energy efficiency of power supply systems.

**Methodology.** Mathematical modeling of electromagnetic compatibility.

**Findings.** The analysis of the problem of energy efficiency and electromagnetic compatibility of powerful energy associations with nonlinear loads and renewable energy sources allows us to formulate the following provisions that determine the objectives of this study. A promising way to increase the energy efficiency of power supply systems is the introduction of refined methods of analysis and forecasting of electrical modes of industrial enterprises, as well as indicators of voltage quality and reliability of electrical equipment.

**Originality.** Although the problem of electromagnetic compatibility has been the subject of numerous domestic and foreign studies, it should be noted that most of these works consider the processes of generating electromagnetic interference in the electrical network without reference to the technological schedules of electrical equipment.

**Practical value.** One of the electromagnetic effects, which is manifested in the operation of frequency converters, are significant levels of interharmonics and higher harmonics, which are generated in the electrical network and contribute to the growth of electricity losses and reduce the service life of electrical equipment. However, the regularities connecting the parameters of the power system and the modes of powerful industrial converters have not been studied, and the substantiation of the parameters of a rational energy efficient mode of the power supply system, taking into account individual graphs of higher harmonics, has not been carried out until today..

**Keywords:** electromagnetic compatibility; modeling; quality of electric energy; renewable energy sources; inverter equipment.

### REFERENCES

- [1] Analitichna dopovid' do shhorichnogo Poslannja Prezidenta Ukraïni do Verhovnoï Radi Ukraïni «Vnutrishne ta zovnishne stanovishhe Ukraïni v 2016 roci». - K.: NISD, 2016, 688, 544- 546.
- [2] Zhezhelenko I.V. (2009). Elektromagnitna sumisnist' u si-stemah elektropostachannja: Pidruchnik / I.V. Zhezhelenko, A.K. Shidlovs'kij, G.G. Pivnjak, Ju.L. Saenko. D.: Nac. girnich. un-t., 319 s.: il.
- [3] Izbrannyye voprosy nesinusoidal'nyh rezhimov v jelektricheskikh setjah predpriyatij / I.V. Zhezhelenko, Ju.L. Saenko, T.K. Baranenko, A.V. Gorpi-nich, V.V. Nesterovich; Pod red. I.V. Zhezhelenko. – M.: Jenergoatomizdat, 2007, 296 s.
- [4] GOST 13109-97. Jelektricheskaja jenergija. Sovmestimost' tehniceskikh sredstv jelektromagnitnaja. Normy kachestva jelektricheskoy jenergii v siste-mah jelektrosnabzhenija obshhego naznachenija. M.: Standartinform , 1997, 60 s.
- [5] Grib O.G. (2010). Kontrol' potreblenija jelektrojen-gerii s uchetom ee kachestva / O.G. Grib, V.I. Va-

- sil'chikov, Ju.S. Gromadskij i dr. Pod red. O.G. Griba. Har'kov: HNURE., 300 s.
- [6] Zhezhelenko I.V. Vysshie garmoniki v sistemah jelektronsabzhenija promyshlennyh predpriyatij. 5-e izd., pererab. i dop. / I.V. Zhezhelenko. – M.: Jenergoatomizdat, 2004.
- [7] Zhezhelenko I.V. (2012). Jelektromagnitnaja sovместimost' v jelektricheskikh setjah / I.V. Zhezhelenko, M.A. Korotchevich. Minsk: Vyshejsnjaja shkola., 197 s.
- [8] Papaika Y. Normalization of voltage quality as the way to ensure energy saving in power supply systems / G. Pivnyak, I. Zhezhelenko, Y. Papaika // CRC Press/Balkema – Taylor & Francis Group: Power Engineering Control and Information Technologies in Geotechnical Systems. – Leiden, The Netherlands, 2013 annual publication. – P. 11-18.
- [9] Papaika Ju.A. (2015). Analiz nesinusoidal'nosti naprugi v sistemi elektropostachannja TOV MZ «Dnipro-stal'» pri roboti potuzhnoï dugovoï staleplavil'noï pechi / Ju.A. Papaika, O.V. Berkovskij // Girnicha elektromehanika ta avtomatika. No 94, S. 17-20.
- [10] Grib O. G. (2013). Analiz i ocenka jekonomicheskikh ushherbov ot nizkogo kachestva jelektricheskoy jenergii : monografija / V.A. Onishhenko, I.A. Samojlenko, O.G. Grib, A.F. Zharkin, V.I. Vasil'chenko, K.V. Ushhapovskij, G.A. Senderovich, A.D. Svetelik, K.I. Kondratenko, O.N. Dovgaljuk, P.G. Shherbakova, N.S. Zaharenko ; pod. obshh. red. prof. V.A. Onishhenko. – Har'kov : HNURJe, 328 s.
- [11] Zhezhelenko I.V. (2017). Ocenka poter' jelektricheskoy jenergii, vyzvannyh snizheniem ee kachestva / I.V. Zhezhelenko, V.V. Nesterovich // Visnik Priazov-s'kogo tehničnogo universitetu: zb. naukovih prac' / PDTU. – Mariupol', Vip.34, s.119-126.
- [12] Zhezhelenko I.V. (2010). Jelektricheskije poteri ot vys-shih garmonik v sistemah jelektronsabzhenija / I.V. Zhezhelenko // Jelektrika. No 4.
- [13] Papaika Ju.A. (2018). Ocinka energetichnoï effektivnosti sistem elektropostachannja za dopomogoju indeksu nadijnosti / I.V. Zhezhelenko, Ju.A. Papaika, O.G. Lisenko // Girnicha elektromehanika ta avtomatika. No 100, 25-30.
- [14] Papaika Ju.A. Zastosuvannja individual'nih grafikiv vishnih garmonik v zadachah elektromagnitnoï sumisnosti ta energoefektivnosti girnichih pidpriemstv / I.V. Zhezhelenko, Ju.A. Papaika, O.G. Lisenko, K.S. Rodna// Girnicha elektromehanika ta avtomatika. – 2019. – № 101. – S. 3-7.
- [15] Intelektual'ni elektrichni merezhi: elementi ta rezhimi: za zag. red. akad. NAN Ukraïni O.V. Ki-rilenka / Institut elektrodinamiki NAN Ukraïni. – K.: In-t elektrodinamiki NAN Ukraïni, 2016. – 400 s.
- [16] Ushhapovskij K.V. (2015). Prognozi rozvitku elektro-nergetiki Ukraïni: ocinka nadijnosti ta dostovirnosti. Jenergosbere-zhenie. Jenergetika. Jenergoaudit. No 7. S. 14-23.
- [17] Ryszard Strzelecki, Henryk Supronowicz. Wspolczynnik mocy w systemach zasilania pradu przemiennego i metody jego poprawy / Ryszard Strzelecki, Henryk Supronowicz, Warszawa: Oficyna Wydaw. Politechniki Warszawskiej, 2000, 452 s.
- [18] A. Ghosh and G. Ledwich, Power Quality Enhancement Using Custom Power Devices. Norwell, MA: Kluwer, 2002.
- [19] Janik P. (2014). Photovoltaic Power Generation Assessment Based on Advanced Signal Processing and Optimisation Techniques. Wroclaw: Publishing house of Wroclaw University of Science and Technology Wroclaw,.
- [20] Janik P., Kosobudzki G., Schwarz. Influence of increasing numbers of RE-inverters on the power quality in the distribution grids: A PQ case study of a representative wind turbine and photovoltaic system. Higher Education Press and Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017, DOI 10.1007/s11708-017-0469-3.
- [21] Zharkin A.F. Normativno-pravovoe regulirovanie kachestva jelektricheskoy jenergii. Analiz ukraïnskikh i evropejskikh zakonodatel'nyh ak-tov i normativno-tehniceskikh dokumentov / A.F. Zharkin, V.A. Novskij, S.A. Palachev. – K.: In-t jelektrodinamiki NAN Ukraïni, 2010, 167 s.
- [22] Papaika Ju.A. (2018). Energetichna effektivnist' sistem elektropostachannja / G.G. Pivnyak, I.V. Zhezhelenko, Ju.A. Papaika. – D.: NTU «DP», 149.
- [23] Jelektromagnitnaja sovместimost' potrebitelej: monogr. /I.V. Zhezhelenko, A.K. Shidlovskij, G.G. Pivnyak, Ju.S. Saenko, N.A. Nojberger. – M.: Mashinostroenie, 2012, 351 s.
- [24] Olishevskij I. G. (2015). Obosnovanie primenenija tep-lonasosnogo oborudovanija dlja utilizacii teplovyh poter' v silovyh transformatorah bol'shoj moshnosti / I. G. Olishevskij, G. S. Olishevskij // Visnik Dnipropetrovs'kogo universitetu. Serija: Raketno-kosmichna tehnika. / Dnibr. nac. un-t im. O. Gonchara. – Dnipropetrovs'k, No 4.
- [25] Pivnyak G.G. (2005). Elektrifikacija girnichih robot / G.G. Pivnyak, M.M. Bilij ta in. – Dnipropetrovs'k: Nacional'nij girnichij universitet, 320 s.
- [26] Olishevskij G. S. (2017). Obosnovanie metoda utilizacii teploty sistemy kondicionirovanija dlja teplonasosnoj sistemy otoplenija / G. S. Olishevskij, I. G. Olishevskij // Informacijni si-stemi, mehanika ta keruvannja / NTUU «Kiïvs'kij politehničnij institut». Kiïv, No 17, 86 – 94.
- [27] Olishevskij I. G. (2015). Obosnovanie racional'noj shemy teplonasosnoj sistemy otoplenija / I. G. Olishevskij // Mehanika giroskopichnih sistem / NTUU «Kiïvs'kij politehničnij institut». Kiïv, No 30, 26-35.
- [28] Papaika, Y., Lysenko, O., Koshelenko, Y. and Olishevskiy, I., (2021). Mathematical modeling of power supply reliability at low voltage quality. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, (2), pp.97-103.

УДК 621.316.35:006.354

## ОСОБЛИВОСТІ ПОЛЬОВОГО МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ ТРОЛЕЙНОГО ШИНОПРОВОДА

- КОЦУР М.І. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електричних та електронних апаратів НУ «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: kotsur8@gmail.com;
- ЯРИМБАШ Д.С. д-р техн. наук, доцент, завідувач кафедри електричних машин НУ «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: yarymbash@gmail.com;
- БЕЗВЕРХНЯ Ю.С. аспірант кафедри електричних та електронних апаратів НУ «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: juliaeea@ukr.net;
- ДІВЧУК Т.Ю. канд. техн. наук, доцент кафедри електричних машин НУ «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: tetiana.divchuk@gmail.com;

**Мета роботи.** Дослідження електромагнітних параметрів тролей шинопроводу, та верифікація отриманих результатів розрахунку за допомогою просторової (3D) та плоско-паралельної (2D) математичних польових моделей.

**Методи дослідження.** Дослідження проводилися із застосуванням методів теорії електромагнітного поля, інтерполяції та апроксимації, математичної фізики, скінченних елементів.

**Отримані результати.** Розроблена математична просторова модель електромагнітних процесів в сталевому тролейному шинопроводі у часовій постановці задачі розподілу електромагнітного поля. Отримані залежності розподілу еквіпотенціальних ліній результуючої z-складової вектору магнітного потенціалу уздовж шинопроводу, а також розподілу результуючої нормальної складової магнітної індукції і напруженості магнітного поля у поперечному (XY) перетині при несинусоїдальному струмі в тролей шинопроводу. Доведено, що уздовж довжини шинопроводу, у поперечному їх перетині, магнітне поле прагне до плоско-паралельної форми. Нев'язка модуля векторного магнітного потенціалу уздовж довжини шинопроводу не перевищує 0,9-1,2%. Для зменшення розмірності задачі, обчислювальних ресурсів та часу на розрахунок, запропонована двомірна плоско-паралельна математична модель у частотній постановці розподілу електромагнітного поля. Для врахування нелінійних магнітних властивостей сталевих тролей запропоновано визначення ефективної кривої намагнічування для нелінійної двовимірної задачі електромагнітного поля шинопроводу. Отримані результати верифікації, за розрахованим падінням напруги, підтверджують високу точність розрахунку та достовірність отриманих результатів (похибка не перевищує 1,88%÷2,06%) двовимірної моделі у частотній постановці по відношенню до просторової моделі в постановці задачі залежної від часу електромагнітного поля.

**Наукова новизна.** Запропоновано математичну двомірну модель електромагнітних процесів у частотній постановці задачі розподілу електромагнітного поля в тролейному шинопроводі, що враховує конструктивні особливості, нелінійність магнітних та електрофізичних властивостей матеріалів, ефекти близькості, поверхневі та зовнішні поверхневі ефекти, вплив гармонійних складових струму на падіння напруги та втрати потужності в процесі електропередачі, яка дозволяє з високою точністю і ефективністю чисельної реалізації визначити параметри тролей шинопроводу для відповідних значень амплітуд та частот вищих гармонік струму.

**Практична цінність.** Проведена верифікація за розрахованим падінням напруги підтверджує високу точність розрахунку та достовірність отриманих результатів (похибка не перевищує 1,88%÷2,06%) двовимірної моделі у частотній постановці по відношенню до просторової моделі в постановці задачі залежної від часу розподілу електромагнітного поля.

**Ключові слова:** шинопровід; електромагнітне поле; 3D та 2D модель; метод; гармоніки; частота, верифікація.

### І. ВСТУП

Забезпечення технологічних операцій для виробництва металургійної енергоємної продукції за допомогою застосування підйомно-транспортних механізмів, в тому числі кранових електроприводів, а також сучасних потужних станків ЧПУ в цехах підприємств є досить енергоємним. Тому для моде-

рнізації власних енергосистем підприємств металургійної та інших промисловостей України необхідно застосування сучасних рішень в області енергоресурсозбереження. Системи цехового електропостачання повинні відповідати жорстким вимогам високої надійності, ефективності та безпеки, забезпечуючи при цьому високу якість електричної ене-

ргії. Сучасні системи цехового електропостачання можуть мати значну протяжність від 300 метрів і більше. Тому, їх параметри і електричні характеристики істотно впливають на якість електроенергії, режими роботи електроприймачів і енергоефективність технологічних процесів [1]. Широке застосування силових напівпровідникових перетворювачів в усіх галузях промисловості дозволило підвищити енергоефективність промислових установок, знизити споживання електроенергії, підвищити якість продукції, що виготовляється [2].

Але вони призводять до генерації вищих гармонійних складових у струмопроводах постійного і змінного струму, що негативно позначається на коефіцієнті потужності мережі [3]. Припустимий гармонійний склад струмів і напруг регламентований стандартом [4], [5]. Наявність вищих гармонік, а також їх відхилення від нормованих значень, негативно впливає на ефективність і надійність елементів системи електропостачання, зокрема цехових шинопроводів. Вони можуть призводити до істотного збільшення електричних опорів шинопроводів, падіння напруги, втрат, зниження коефіцієнта потужності, перегріву провідників шинопроводів і виходу їх з ладу

## II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Відомо, що класичні інженерні методи розрахунку параметрів і електромагнітних характеристик тролейного шинопровода в різних режимах роботи різноманітних струмоприймачів, засновані на цілому ряді припущень [1,2], які можуть призводити до суттєвої похибки розрахунку, що не задовольняє сучасним вимогам до енергоефективності. Поряд з класичними методами найбільш популярними на сьогоднішній день в інженерній практиці, а також серед дослідників, застосовуються методи схемного моделювання [6]-[15]. Параметри схем, як правило, визначаються на основі узагальнених рівнянь. Ці рівняння отримані в наслідок ряду припущень і наближень, що значно обмежує область їх використання. Застосування методик на їх основі не дозволяє забезпечити необхідну точність і достовірність результатів, врахувати вплив гармонійного складу струмів і напруг, нелінійність властивостей активних матеріалів, поверхневі ефекти, ефекти близькості та ін. Методи оцінки впливу гармонійного складу струмів і напруг на параметри і характеристики шинопроводів, запропоновані в [16], засновані на емпіричних залежностях і не враховують геометрію активних матеріалів, а також їх електромагнітні властивості.

Набуло поширення застосування методів розрахунку на основі польового моделювання для широкого класу задач електротехніки [17]-[18]. Їх основним обмеженням є необхідність використання спеціалізованого програмного забезпечення, високі витрати обчислювальних ресурсів і часу на чисель-

ну реалізацію.

В роботах [17] - [20] пропонується визначити електромагнітні параметри електротехнічних систем перетворення змінного струму на основі реалізації найефективнішої 3D моделі електромагнітного поля для завдання в time step формулюванні. Такий підхід дозволяє враховувати нелінійність властивостей активних матеріалів, гармонійний склад струмів і напруг, але вимагає значних витрат часу на чисельну реалізацію через необхідність збіжності розрахунку кожного часового шару. В роботі [19] було запропоновано модель поля у частотному формулюванні. Такий підхід вимагає значно менших витрат часу на чисельну реалізацію і дозволяє врахувати окремо вплив кожної гармонійної складової струму і напруги на параметри і характеристики шинопроводів. Однак, використання частотного формулювання розрахунку розподілу електромагнітного поля може бути застосовано тільки для лінійних задач. Для врахування нелінійності магнітних властивостей в [18] запропоновано використання ефективних значень магнітних властивостей феромагнітних матеріалів. Це дозволяє враховувати нелінійність властивостей як основних струмоведучих, так і допоміжних матеріалів в частотних постановках розрахунку розподілу магнітного поля.

Тому актуальним завданням є розробка математичної двомірної моделі в частотних постановках розрахунку розподілу магнітного поля, яка враховує конструктивні особливості, нелінійність магнітних та електрофізичних властивостей матеріалів, ефекти близькості, поверхневі та зовнішні поверхневі ефекти, вплив гармонійних складових струму на падіння напруги та втрати потужності в процесі електропередачі, яка дозволяє у порівнянні з 3D польовою моделлю з високою точністю і ефективністю чисельної реалізації визначити параметри тролей шинопровода для відповідних значень амплітуд та частот вищих гармонік струму.

## III. МЕТА РОБОТИ

Дослідження електромагнітних параметрів тролей шинопроводу, та верифікація отриманих результатів розрахунку за допомогою просторової (3D) та плоско-паралельної (2D) математичних польових моделей.

## IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛА І АНАЛІЗ ОТРИМАННИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

При дослідженні особливостей розподілу електромагнітного поля в активній частині тролейного шинопроводу приймаються наступні припущення та умови [2], [4], [6], [7]:

- відсутні монтажні тримачі шинопроводу, болтові з'єднання, а також його кріпильних елементів; не враховуються електрофізичні властивості

ізоляторів, їх опір дорівнює нескінченності;

- у випадку наявності металевого екрануючого кожуха шинопроводу, розподіл магнітного поля за межі розрахункової області відсутній. При цьому, магнітне поле, що створюється струмами, які протікають в трелеях шинопроводу, локалізується в сталевому кожусі і не виходить за його межі;

- приймається, що струми зміщення відсутні;

- електротехнічні системи цехового навантаження симетричні, струми що протікають в шинопроводах рівні за амплітудним значенням, фазовий зсув між фазами шинопроводу складає 120 ел. град;

- в середовищі моделювання електромагнітних процесів шинопроводу відсутні вільні заряди.

Для розрахунку просторового магнітного поля формуються розрахункові області для найпоширеніших трелейних шинопроводів з прямокутного профілю (рис.1). Для цих розрахункових областей системи з трелейних шинопроводів відповідають рівняння для векторного магнітного потенціалу [8]:

$$\{\bar{B}\} = \text{rot}\{\bar{A}\} \quad (1)$$

де  $\bar{B}$  - вектор магнітної індукції, Тл;  $\bar{A}$  - вектор магнітного потенціалу Вб/м.

Геометрична просторова модель трелейного шинопроводу має підобластні компоненти з різними електричними та магнітними властивостями: фазні трелеї шинопроводу (1 – фаза А, 2 – фаза В, 3 – фаза С); 4 – кронштейн; 5 – ізолятор; 6 – повітря (рис.1.)

Для багатоелементного модельного середовища трелейних фазних шинопроводів з різними магнітними і електрофізичними властивостями, система рівнянь другого порядку в вираженні векторного магнітного потенціалу (1) має вигляд [9]:

$$\begin{cases} \sigma_j \partial A_j / \partial \tau + \sigma_j (\theta_j) \nabla V_j + \\ + \nabla \times [(\mu_0 \mu_j (B))^{-1} \nabla \times A_j] = J_{ej}; \\ - \nabla \cdot \partial (\varepsilon_0 \varepsilon_r \nabla V_j) / \partial \tau - \\ - \nabla \cdot (\sigma_j (\theta_j) \cdot \nabla V_j - J_{ej}) = 0, \end{cases} \quad (2)$$

де  $V$  – електричний потенціал, В;  $\sigma(\theta)$  – питома електропровідність, См/м;  $\mu$  – відносна магнітна проникність;  $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$  – магнітна постійна, Гн/м;  $\varepsilon_r$  – відносна діелектрична проникність;  $\theta$  – температура, К;  $\omega$  – кутова частота, рад/с;  $J_e$  – щільність стороннього джерела струму, А/м;  $j$  – індекси, що відповідають розрахунковим компонентам геометричної розрахункової області (рис. 1).

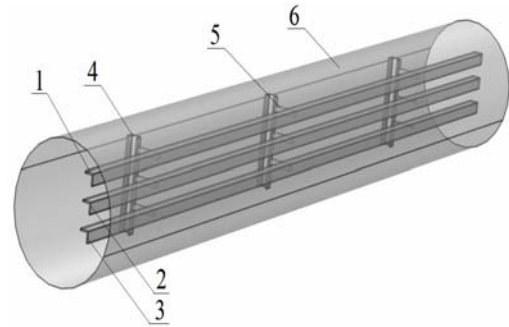


Рисунок 1. – Геометрична розрахункова область трелейних шинопроводів

Температурний режим шинопроводу вважається стаціонарним і оцінюється відповідно до даних [10]. Питома електрична провідність шинопроводу враховується у відповідності з [11]:

$$\sigma(\theta) = \frac{\sigma(\theta_0)}{[1 + \alpha_\rho \cdot (\theta - \theta_0)]} \quad (3)$$

де  $\sigma_0$  – питома електрична провідність шинопроводу;  $\alpha_\rho$  – температурний коефіцієнт опору;  $\theta_0$  – температура шинопроводу при визначенні питомої електричної провідності шинопроводу за довідниковими значеннями [11];  $\theta$  – температура шинопроводу під робочим струмовим навантаженням.

У тривимірному просторі вектор магнітного потенціалу має вигляд [12]:

$$\mathbf{A}_{i,j} = iA_{x_{i,j}} + jA_{y_{i,j}} + kA_{z_{i,j}} \quad (4)$$

Для системи рівнянь (2.2) задаються умови Коші для визначення початкових умов [13]:

$$A_i|_{t=0} = A_{0,i} \quad (5)$$

У відповідності [13], [14] система рівнянь (2) доповнюється умовами калібрування Кулона:

$$\text{div}\{\bar{A}\} = 0 \quad (6)$$

Умови сполучення для магнітних і електричних полів можна сформулювати у вигляді [15, 16]:

$$\begin{cases} n_{i,k} \times (H_i - H_k) = 0|_{\forall i,k \in (1,6), i \neq k}, \\ H = (\mu_0 \mu)^{-1} \nabla \times A, \\ n_{i,k} \cdot (J_i - J_k) = 0|_{\forall i,k \in (1,6), i \neq k}, \\ J = \sigma(\theta) \cdot E, \quad E = -\nabla V - j\omega A \end{cases} \quad (7)$$

де  $H$  - напруженість магнітного поля;  $E$  - напруженість електричного поля.

На зовнішніх границях розрахункової області задаються граничні умови [17]:



$$\begin{cases} A_j = 0 \Big|_{\forall j \in (1,6)}, A_j = \bar{k} \cdot A_y(x,z) \Big|_{j=1}, \\ V_j = \varphi_j \Big|_{\forall j \in (1,6)}, \\ n_j \cdot (J_j) = 0 \Big|_{j=1} \end{cases} \quad (8)$$

Для врахування магнітних властивостей матеріалів (сталь, мідь) застосовуються залежності  $\mu = f(B, H)$ , що наведені в [27]-[29].

Щільність фазного струму в шинопроводі визначається співвідношенням [18]:

$$\mathbf{J}_\phi = \frac{I_\phi}{A} \mathbf{e}_{coil} \quad (9)$$

де  $I_\phi$  – фазний струм;  $A$  – поперечний переріз

ефективного провідника;  $\mathbf{e}_{coil}$  – векторна змінна, що представляє локальну щільність шинопровода, його довжину й поперечний переріз.

Трифазну систему струмів шинопроводів з врахуванням вищих гармонік представлено у вигляді:

$$\begin{cases} I_{A,k} = \sum_{k=1}^{\infty} I_{mk} \cdot \sin(\omega \cdot t + \psi_k) \\ I_{B,k} = \sum_{k=1}^{\infty} I_{mk} \cdot \sin(\omega \cdot t + \psi_k + \frac{2 \cdot \pi}{3}) \\ I_{C,k} = \sum_{k=1}^{\infty} I_{mk} \cdot \sin(\omega \cdot t + \psi_k - \frac{2 \cdot \pi}{3}) \end{cases} \quad (10)$$

де  $\psi_k$  – кут зсуву  $k$ -ї гармоніки струму від основної;  $I_{mk}$  – амплітуда  $k$ -ї гармоніки струму.

Методи щодо визначення індуктивності і взаємної індуктивності контурів зі струмом [19]-[24] справедливі для умови рівномірного розподілу фаз щільності векторів струму в струмопровідних елементах. Однак, при врахуванні вищих гармонік струму, умова рівномірного розподілу може не виконуватись, тому доцільним являється застосування інтегральних співвідношень енергії магнітного поля, а також активної, реактивної та повної потужностей.

Енергія магнітного поля в геометричних елементах конструкції шинопроводу з врахуванням вищих гармонік струму може бути представлена у вигляді [23], [24]:

$$W_k \Big|_j = \sum_{k=1}^n \frac{1}{2} \iiint (B_k \cdot H_k) dx dy dz. \quad (11)$$

Питома енергія магнітного поля:

$$w_k \Big|_j = W_k \Big|_j / V_j \quad (12)$$

де  $V_j$  – об'єм струмопровідних елементів розрахункової моделі ( $j = 1, 2, 3$ );

Активні втрати та питомі активні втрати в геометричних елементах конструкції шинопровода з врахуванням вищих гармонік струму можуть бути представлені у вигляді [23, 24]:

$$P_k \Big|_j = \sum_{k=1}^n \iiint \sigma_j^{-1} \mathbf{J}_k \cdot (\mathbf{J})^* dx dy dz, \quad (13)$$

$$p_k \Big|_j = P_k \Big|_j / V_j. \quad (14)$$

Реактивна потужність:

$$Q_k \Big|_j = \sum_{k=1}^n \omega \cdot W_k \Big|_j = \sum_{k=1}^n 2\pi \cdot f \cdot k \cdot W_k \Big|_j \quad (15)$$

Повна потужність:

$$S_k \Big|_j = \sqrt{P_k^2 + Q_k^2} \Big|_{j=1,2,3}, \quad (16)$$

Повний опір фазних шинопроводів може бути представлено у вигляді [23, 24]:

$$Z_j = |Z_j| e^{i\varphi_j} \Big|_{j=1,2,3}, \quad (17)$$

або

$$Z_k \Big|_j = \frac{S_k}{\mathbf{I}_k^2} \Big|_{j=1,2,3}, \quad (18)$$

або

$$Z_k \Big|_j = \sqrt{R_k^2 + X_k^2} \Big|_{j=1,2,3}, \quad (19)$$

Активний опір фазних шинопроводів:

$$R_k \Big|_j = \frac{P_k}{S_k} \Big|_j \quad (20)$$

Індуктивність фазних шинопроводів:

$$L_k \Big|_j = \frac{2 \cdot W_k}{\mathbf{I}_k^2} \Big|_j \quad (21)$$

Індуктивний опір фазних шинопроводів:

$$X_k \Big|_j = \omega L_k \Big|_j = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot k \cdot L_k \Big|_j \quad (22)$$

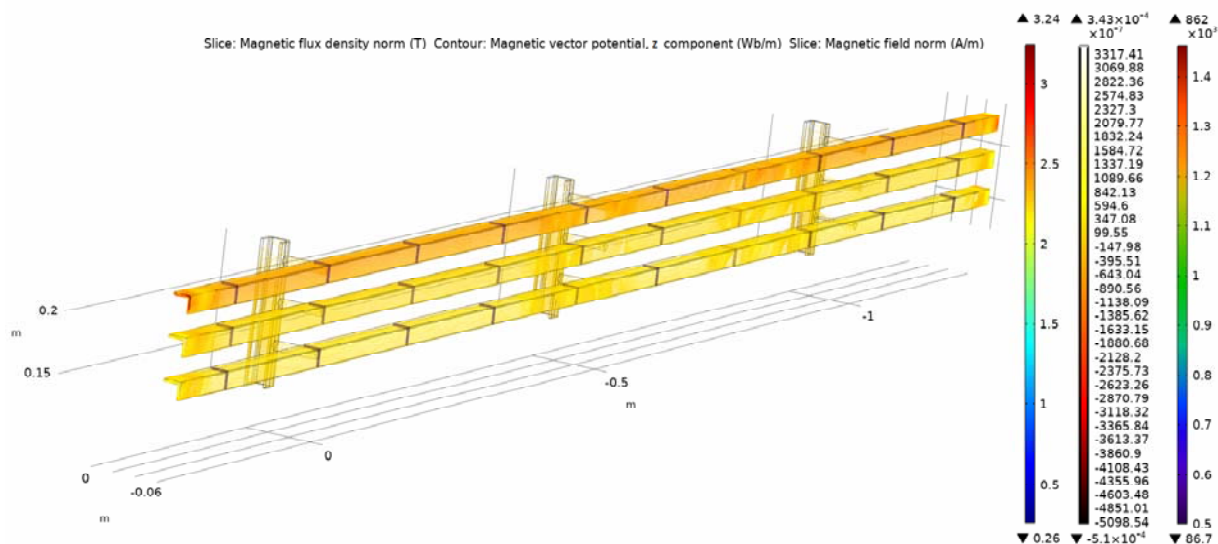
Падіння напруги в фазних шинопроводах:

$$\Delta U_k \Big|_j = \frac{Z_k}{\mathbf{I}_k} \Big|_j \quad (23)$$

На рис.2 наведені результати просторового польового моделювання у вигляді розподілу екви-

потенціальних ліній результуючої z-складової вектору магнітного потенціалу уздовж шинопроводів, а також розподілу результуючої нормальної складової магнітної індукції і напруженості магнітного поля у поперечному (XY) перетині при несинусоїдальному струмі фазних шинопроводів. Результати просторового польового моделювання отримані за

допомогою методу кінцевих елементів в структурі засобів ПЗ COMSOL Multiphysics. Кількість перетинів дорівнює 10, які рівномірно розподілені уздовж довжини всього шинопровода.



**Рисунок 2.** Результати чисельного просторового моделювання розподілу електромагнітного поля в тролейних шинопроводах

Тролеї виконані з прямокутного сталюого профілю розміром 30x30x4 при значенні струму основної гармоніки  $I_{m1}=75A$ . Амплітудні значення струмів вищих гармонік обиралися згідно стандарту [25], в якому задекларовані норми генерації гармонійних складових струму для симетричних трифазних електромеханічних систем (табл. 1) при коефіцієнті короткого замикання  $R_{sce}=33$  в.о.

Для візуалізації даних чисельного моделювання відображається область локалізації магнітного поля для моменту часу, коли струм фази А лімітується максимальним амплітудним значенням при  $\tau = 0,005c$ . Ця область відповідає діапазону змін модуля векторного магнітного потенціалу, для фази А обмеженого значеннями  $|A_{min}| = 0,4 \cdot 10^{-3}$  Вб/м та  $|A_{max}| = 0,405 \cdot 10^{-4}$  Вб/м; для фази В –  $|A_{min}| = 0,85 \cdot 10^{-4}$  Вб/м та  $|A_{max}| = 0,867 \cdot 10^{-4}$  Вб/м; для фази С –  $|A_{min}| = 1,05 \cdot 10^{-4}$  Вб/м та  $|A_{max}| = 1,062 \cdot 10^{-4}$  Вб/м (рис.2). Як показує аналіз, уздовж довжини шинопроводів у поперечному їх перетині магнітне поле прагне до плоско-паралельної форми. Нев'язка модуля векторного магнітного потенціалу уздовж довжини шинопроводів не перевищує 0,9-1,2%. Тому доцільним є перехід від просторового до плоско-паралельного формулювання розподілу електрома-

гнітного поля, так як чисельна реалізація просторової моделі електромагнітного поля змінного у часі є дуже складна і потребує значних обчислювальних ресурсів та часу на розрахунок.

**Таблиця 1.** – Норми генерації гармонійних складових струму для симетричних трифазних технічних засобів

Мінімальне значення $R_{sce}$ , в.о.	Гранично допустиме значення гармонійної складової струму, $I_k/I_1$ , %				Гранично допустиме значення коефіцієнта гармонійних складових, %	
	Номер гармоніки				СКГС	ЧЗКС
	5	7	11	13		
33	10,7	7,2	3,1	2	13	22
66	14	9	5	3	16	25
120	19	12	7	4	22	28
250	31	20	12	7	37	38
$\geq 350$	40	25	15	10	48	46

Для істотного скорочення розмірність задачі та підвищення ефективності обчислення пропонується для розрахунку розподілу електромагнітного поля в елементах конструкції тролейних шинопро-

водів застосовувати відому польову модель у частотному формулюванні [30]-[33].

Система рівнянь Максвелла формується для комплексних амплітуд векторного магнітного і електричного потенціалів в геометричних електропровідних областях тролейного шинопровода, за наявності сталевих кожухів і оточуючого їх електроізоляційного середовища (повітря):

$$\begin{cases} -\nabla \cdot [(j\omega\sigma_j - \omega^2\varepsilon_0\varepsilon_{r,j}) \cdot \mathbf{A}_j + \\ + (\sigma_j + i\omega\varepsilon_0\varepsilon_{r,j}) \nabla V_j - \mathbf{J}_j^e] = 0; \\ (i\omega\sigma_j - \omega^2\varepsilon_0\varepsilon_{r,j}) \mathbf{A}_j + \nabla \times (\mu_0^{-1} \mu_{r,j}^{-1} \nabla \times \mathbf{A}_j) + \\ + (\sigma_j + j\omega\varepsilon_0\varepsilon_{r,j}) \nabla V_j = \mathbf{J}_j^e; \end{cases} \quad (24)$$

де  $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$  – електрична постійна, Ф/м;  $|V|$  – комплексна амплітуда електричного потенціалу, В;  $\mu_r$  – ефективна магнітна проникність; індекс  $j=0$  – відповідає області електроізоляційного та навколишнього середовища; індекси  $j=1,2..n$  – відповідають областям струмопровідних тролей і кожухів.

Проекції векторного магнітного потенціалу та електричні потенціали є параметричними функціями кутовий частоти змінного струму. Формулювання розподілу електромагнітного поля в плоскопаралельному наближенні та має наступний вигляд [34-35]:

$$\begin{cases} \mathbf{A}_j = i_z \cdot A_{z,j}, \\ \mathbf{B}_j = i_x \cdot B_{x,j} + i_y \cdot B_{y,j}, \\ \mathbf{H}_j = i_x \cdot H_{x,j} + i_y \cdot H_{y,j}, \\ V_j = i_z \cdot V_{z,i} \end{cases} \quad (25)$$

де  $i_x, i_y, i_z$  - просторові одиничні вектори.

Система рівнянь (2), (24) доповнюється умовами калібрування Кулона, умовами сполучення областей з різними електричними і магнітними властивостями і умовами електричної і магнітної ізоляції на зовнішніх межах за допомогою рівнянь (6)-(8). Щільність фазного струму в шинопроводі визначається співвідношенням (9).

Трифазна система струмів шинопроводів для польової стаціонарної моделі у частотному формулюванні для кожної окремої частоти та амплітуди гармоніки має вигляд:

$$\begin{cases} I_{A,k} = \sqrt{2} \cdot I_k \cdot e^{-j2\pi \cdot f_k \cdot t} \\ I_{B,k} = \sqrt{2} \cdot I_k \cdot e^{-j2\pi \cdot f_k \cdot t + j\left(\frac{2\pi}{3}\right)}, \\ I_{C,k} = \sqrt{2} \cdot I_k \cdot e^{-j2\pi \cdot f_k \cdot t + j\left(\frac{4\pi}{3}\right)} \end{cases} \quad (26)$$

де  $I_k$  - ефективне значення струму  $k$ -ї гармоніки;  $f_k$  - частота струму  $k$ -ї гармоніки;

При застосуванні польової моделі при частотному формулюванні поля потрібно визначати ефективну криву намагнічування для нелінійної двовимірної задачі електромагнітного поля шинопроводів, які виготовлені зі сталі. Для визначення ефективної кривої намагнічування сталі потрібно застосувати просторову польову модель в постановці задачі залежної від часу протікання електромагнітних процесів в шинопроводі. Нелінійні властивості сталі можна представити як ефективні властивості певного ізотропного та однорідного уявного матеріалу [29], [36], [37].

В умовах дії змінного струму уявний матеріал буде мати магнітні властивості сталі, які мають нелінійну залежність від магнітної індукції та напруженості магнітного поля [30].

Згідно [29], [36], [37] для створення ефективної кривої сталі для двовимірної моделі електромагнітного поля, величини магнітної індукції  $B$  та напруженості магнітного поля  $H$  можуть бути визначені як функція простору та часу:

$$\begin{aligned} B(r,t) = & \sqrt{B_x^2(r) \cdot \cos^2(\omega t + \varphi_x(r)) +} \\ & B_y^2(r) \cdot \cos^2(\omega t + \varphi_y(r))}, \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} H(r,t) = & \sqrt{H_x^2(r) \cdot \cos^2(\omega t + \varphi_x(r)) +} \\ & H_y^2(r) \cdot \cos^2(\omega t + \varphi_y(r))}. \end{aligned} \quad (28)$$

Для формування ефективної кривої намагнічування сталі враховується лише залежність магнітної індукції від часу  $B(t)$ , яка представляє собою періодичну функцію, значення якої змінюються від  $B_{\min}$  до  $B_{\max}$ , та набувають цих значень в залежності від фазових кутів  $\varphi_x$  та  $\varphi_y$  при певних значеннях  $B_x$  та  $B_y$ . [29], [38]. Апроксимація функціональної залежності магнітної індукції  $B(t)$  виконується в залежності від  $\varphi_x, \varphi_y, B_x, B_y$ . [29]. Завдяки чому можна отримати сімейство кривих намагнічування [29]. В [29], [39] автори пропонують для забезпечення простої та ефективної апроксимації прирівняти фазові кути  $\varphi_x$  та  $\varphi_y$ , тобто  $\varphi_x = \varphi_y$ , а залежності  $B(t)$  замінити на подібну до функції  $\cos(\omega t)$  [29], [39].

Залежність магнітної індукції від часу  $B(t)$  для математичної моделі (26), що виражена у формулюванні векторного магнітного потенціалу, згідно [40] можна представити у вигляді:

$$B(t) = \hat{B} \cdot |\cos(\omega t)| \quad (29)$$

Щодо залежності напруженості магнітного від

часу  $H(t)$  згідно [39]:

$$H(t) = \hat{H} \cdot |\cos(\omega t)| \quad (30)$$

Магнітні властивості уявного матеріалу на основі відомої кривої намагнічування сталі марки Ст.3 можна описати за допомогою методу середньоквадратичного значення [39] для вже відомих часових залежностей магнітної індукції від часу  $B(t)$  та напруженості магнітного поля  $H(t)$ :

$$\nu_{ef} = \frac{H_{ck3}}{B_{ck3}} = \frac{\sqrt{2} \cdot \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T H^2(t) dt}}{\hat{B}}, \quad (31)$$

де  $T$  - період періодичних функцій  $B(t)$  та  $H(t)$ .

Враховуючи залежність (32), згідно [29, 38] ефективна магнітна проникність визначається за наступним рівнянням:

$$\mu_{ef} = \frac{B_{ck3}}{H_{ck3}} = \frac{\sqrt{2} \cdot \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T B^2(t) dt}}{\hat{H}}. \quad (32)$$

Враховуючи відомі значення  $H_{ck3}$  та  $B_{ck3}$  можна побудувати ефективну криву намагнічування сталі марки Ст.3. Розв'язання рівняння (26) методом скінчених елементів використовуються рівняння (29) для розрахунку середньоквадратичного значення  $B(t)$ , а для  $H(t)$  - рівняння (30) [29], [38].

При розрахунку електромагнітних параметрів поля, а також активних та індуктивних параметрів шинопроводів при частотному формулюванні задачі, для кожної амплітуди та частоти відповідної  $k$ -ї гармоніки виконується умова суперпозиції для електромагнітного поля за законом Біо-Савара [40]:

$$\begin{cases} \vec{B} = \sum_k \vec{B}_k \\ \vec{B} = \int d\vec{B} \end{cases} \quad (33)$$

Для двовимірної польової моделі у частотній постановці задачі енергія магнітного поля, в геометричних елементах конструкції шинопровода з врахуванням вищих гармонік струму відповідно до (12) може бути представлена у вигляді [23, 24]:

$$W_k|_j = \sum_{k=1}^n \frac{1}{2} \iint_{S_j} (B_k \cdot H_k) dx dy. \quad (34)$$

де  $S_j$  - площа перетину  $j$ -го елемента геометричної моделі трифазних шинопроводів ( $j=1,2,3$ ).

Активні втрати:

$$P_k|_j = \sum_{k=1}^n \iint_{S_j} \sigma_j^{-1} \mathbf{j}_k \cdot (\mathbf{j})^* dx dy. \quad (35)$$

Враховуючи рівняння (36) та (37) повний, активний та реактивний опори можна визначити відповідно до рівнянь (19), (21), (23). Падіння напруги в фазних шинопроводах відповідно до (24).

Для визначення точності розрахунку запропонованої двовимірної польової моделі у частотній постановці, а також підтвердження достовірності та прийнятності умов суперпозиції електромагнітного поля при декомпозиції електромагнітних процесів у тролейних шинопроводах для окремих амплітуд та частот  $k$ -х гармонік струму необхідно провести верифікацію розрахунків часозалежної просторової моделі електромагнітного поля у формуваннях векторного магнітного потенціалу за (2) та двовимірної моделі електромагнітного поля у формуваннях векторного магнітного потенціалу при частотній постановці задачі за (25).

На рис.3 наведені результати двовимірного польового моделювання при частотній постановці задачі у вигляді нормальної складової магнітної індукції для сталевих тролейних шинопроводів куткової форми за амплітудою і частотою основної гармоніки струму (рис. 3, а), та у вигляді розподілу вектору магнітного потенціалу за амплітудою і частотою  $k=1,5,13$  гармонік струму (рис. 2.3, б, в, г), відповідно до табл. 1. Початкові данні моделювання повністю відповідають даним при моделюванні просторового електромагнітного поля (рис.2).

При зростанні частоти гармоніки струму, незалежно від амплітуди  $k$ -ї гармоніки фазовий зсув між вектором струму та вектором падіння напруги зменшується: при  $f=50$ Гц -  $\varphi_A|_{f=50} = 45,24$  ел. град,

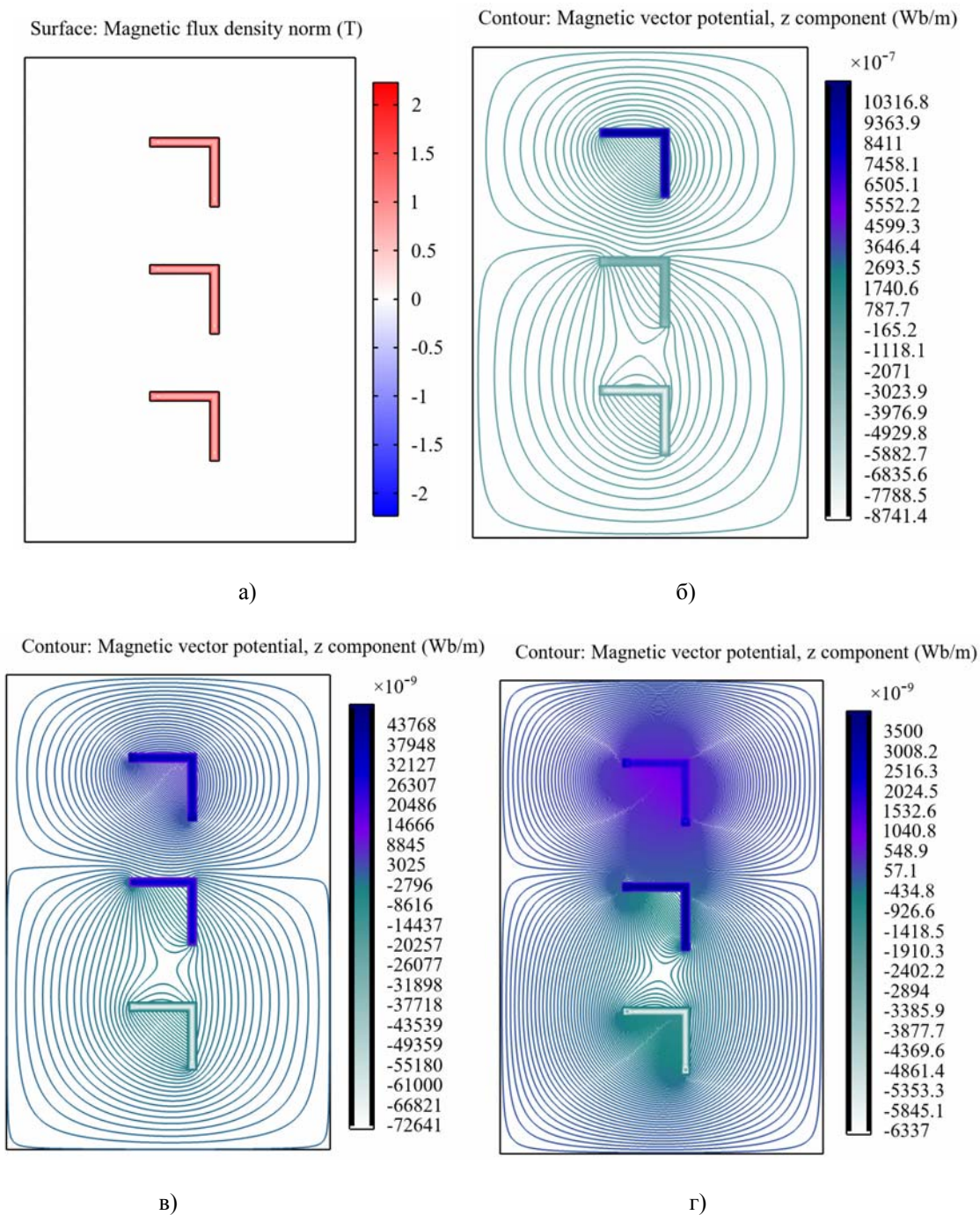
$\varphi_B|_{f=50} = 164,94$  ел. град,  $\varphi_C|_{f=50} = -75,35$  ел. град; при

$f=250$ Гц -  $\varphi_A|_{f=250} = 29,35$  ел. град,  $\varphi_B|_{f=250} = 148,94$

ел. град,  $\varphi_C|_{f=250} = -91,5$  ел. град; при  $f=650$ Гц -

$\varphi_A|_{f=650} = 20$  ел. град,  $\varphi_B|_{f=650} = 140,24$  ел. град,

$\varphi_C|_{f=650} = -100,43$  ел. град. Це обумовлено зростанням впливу процесами підмагнічення фази В, що викликано відстаючим вектором струму фази А відносно фази В, та розмагнічення фази В, що викликано випереджаючим вектором струму фази А [41]. Зростання впливу процесів підмагнічення та розмагнічення при більших значеннях  $f$  призводить до зміни напрямку вектору магнітного потенціалу у зоні локалізації шинопровода фази В (рис. 3, б, в, г).



а) нормальної складової магнітної індукції при  $f = 50\text{Гц}$ ,  $I_m = I_{m1}A$ ; б) розподіл вектору магнітного потенціалу при  $f = 50\text{Гц}$ ,  $I_m = I_{m1}A$ ; в) розподіл вектору магнітного потенціалу при  $f = 250\text{Гц}$ ,  $I_m = 0,107 I_{m1}A$ ; г) розподіл вектору магнітного потенціалу при  $f = 650\text{Гц}$ ,  $I_m = 0,002 I_{m1}A$ ;

**Рисунок 3.** Результати двовимірного польового моделювання при частотній постановці задачі для сталевих тролейних шинопроводів куткової форми

Згідно [40] результуюче значення падіння напруги від сумарної дії  $k$ -х гармонік струму можна визначити за наступним виразом:

$$\Delta U_{\text{рез}} \Big|_j = \sqrt{\sum_k \Delta U_k^2} \Big|_j \quad (36)$$

Результуюче значення повного опору шиноп-

роводів від вищих гармонік струму, враховуючи (20) можна визначити за наступним рівнянням:

$$\begin{aligned} Z_{pez} \Big|_j &= \sqrt{\sum_k Z_k^2 \Big|_j} = \sqrt{\sum_k (R_k^2 + X_k^2) \Big|_j} = \\ &= \sqrt{R_{pez}^2 + X_{pez}^2} \Big|_j. \end{aligned} \quad (37)$$

В табл. 2 наведені значення падіння напруги, розрахованої за просторовою моделлю електромагнітного поля за (2) та значення результуючого падіння напруги за двовимірною польовою моделлю у частотній постановці задачі. Результати верифікації за розрахованим падінням напруги підтверджують високу точність розрахунку та достовірність отриманих результатів (похибка не перевищує 1,88%÷2,06%) двовимірної моделі у частотній постановці по відношенню до просторової часозалежної моделі електромагнітного поля.

**Таблиця 2.** Результати верифікації моделей електромагнітного поля

Розраховані параметри $\Delta U_{pez}$ , В/м	За просторовою моделлю	За двовимірною моделлю у частотному формулюванні	Відносна нев'язка, %
фаза А	0,2253	0,2208	1,99
фаза В	0,2273	0,2226	2,06
фаза С	0,2285	0,2242	1,88

Таким чином двовимірна польова моделі у частотній постановці задачі дозволяє з високою точністю та ефективністю чисельної реалізації проводити декомпозицію електромагнітних процесів в тролейних шинопроводів та для кожної відповідної амплітуди та частоти  $k$ -ї гармоніки мережевого струму визначати електромагнітні параметри та параметри тролейних шинопроводів з врахуванням їх конструктивних особливостей, нелінійність магнітних та електрофізичних властивостей матеріалів, ефекту близькості, поверхневих та зовнішніх поверхневих ефектів.

## V. ВИСНОВКИ

Запропоновано математичну модель для завдання у частотному формулюванні електромагнітних процесів в сталевих та мідних тролей шинопровода, що враховує конструктивні особливості, нелінійність магнітних та електрофізичних властивостей матеріалів, ефекти близькості, поверхневі та зовнішні поверхневі ефекти, вплив гармонійних складових струму на падіння напруги та втрати потужності в процесі електропередачі, яка дозволяє з високою точністю і ефективністю чисельної реалізації визначити параметри тролей шинопровода для відповідних значень амплітуд та частот вищих гармонік струму.

Отримані значення падіння напруги, розрахованої за просторовою моделлю електромагнітного поля та значення результуючого падіння напруги за двовимірною польовою моделлю у частотній постановці задачі. Результати верифікації за розрахованим падінням напруги підтверджують високу точність розрахунку та достовірність отриманих результатів (похибка не перевищує 1,73%÷1,9%) двовимірної моделі у частотній постановці по відношенню до просторової моделі в постановці задачі залежної від часу електромагнітного поля.

Запропонована математична модель для завдання у частотному формулюванні електромагнітних процесів в сталевих та мідних тролей шинопровода може застосовуватись для розрахунку параметрів, втрат напруги, енергії магнітного поля та активних втрат для різних форм тролей шинопровода та відстаней між ними з урахуванням та без урахування екрануючих елементів для кожних  $k$ -х гармонік мережевого струму.

Запропонована математична модель для завдання у частотному формулюванні електромагнітних процесів в сталевих та мідних тролей шинопровода може застосовуватись для розрахунку параметрів, втрат напруги, енергії магнітного поля та активних втрат для різних форм тролей шинопровода та відстаней між ними з урахуванням та без урахування екрануючих елементів для кожних  $k$ -х гармонік мережевого струму.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Яримбаш, Д. С. Особенности трехмерного моделирования электромагнитных полей асинхронного двигателя [Текст] / Д. С. Яримбаш, М. И. Коцур, С. Т. Яримбаш, И. М. Коцур // Электротехника та електроенергетика – 2016. – №2 – С. 43 – 50. DOI: <http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2016-2-5>
- [2] Yarymbash, D. A New Simulation Approach of the Electromagnetic Fields in Electrical Machines [Text] / D. Yarymbash, M. Kotsur, S. Subbotin, A. Oliinyk // IEEE: The International Conference on Information and Digital Technologies, July 5th - 7th, Zilina, Slovakia. – 2017. - Catalog Number CFP17CDT-USB. - pp. 452-457. DOI: 10.1109/DT.2017.8024332.
- [3] Yarymbash, D. Analysis of inrush currents of the unloaded transformer using the circuitfield modelling methods [Text] / D.Yarymbash, S. Yarymbash, M. Kotsur, T. Divchuk // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2018. – Vol. 3. –№ 5 (93). – P. 6-11. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.134248
- [4] Jiang, B. N. The origin of spurious solutions in computational electromagnetics [Text] / B.N. Jiang, J. Wu, L.A. Povinelli // Comput. Phys. – 1996. – Vol. 125. – P. 104–123.
- [5] Yarymbash, D. Parameters Determination of the Trolley Busbars by Electromagnetic Field Simulation [Text] / D. Yarymbash, M. Kotsur, Yu. Bezverkhnia, I. Kotsur // IEEE: 2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS), September 10-14,

- Kharkiv, Ukraine, 2018, pp. 76-79. DOI: 10.1109/IEPS.2018.8559576
- [6] Yarymbash, D. Electromagnetic parameters determination of power transformers [Text] / D. Yarymbash, M. Kotsur, S. Yarymbash, T. Divchuk // IEEE: 2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS), September 10-14, Kharkiv, Ukraine, 2018, pp. 70-75. DOI: 10.1109/IEPS.2018.8559573
- [7] Yarymbash, D.S. Hysteresis and eddy currents effects simulation in idling mode of the transformer [Text] / D.S. Yarymbash, M.I. Kotsur, S.T. Yarymbash, T.Ye. Divchuk // Problemele energeticii regionale. – 2019. - №1(39). – P. 12-21. – Режим доступу: DOI: 10.5281/zenodo.2650413.
- [8] Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле [Текст] / Л. А. Бессонов. – М.: Высшая школа, 2003. – 317 с.
- [9] Демирчан, К. С. Машинные расчеты электромагнитных полей [Текст] / К. С. Демирчан, В. Л. Чечурин. – М.: Высш. школа, 1986. – 240 с.
- [10] Delgado F. 3D thermal model and experimental validation of a low voltage three-phase busduct [Text] / F. Delgado, C.J. Renedo, A. Ortiz, I. Fernández, A. Santisteban // Applied Thermal Engineering. – 2017. - Volume 110. - №5. - P. 1643-1652 DOI:10.1016/j.applthermaleng.2016.09.002
- [11] Филиппов, И. В. Теплообмен в электрических машинах [Текст]: учеб. пос. для вузов / И. В. Филиппов. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 256 с.
- [12] Дивчук, Т.Е. Уточнючий підхід до визначення функціональних залежностей відносних магнітних проникностей анізотропних холоднокатаних електротехнічних сталей [Текст] / Т.Е. Дивчук, Д.С. Яримбаш, С.Т. Яримбаш, І.М. Килимник, М. І. Коцур, Ю. С. Безверхня // Електротехніка та електроенергетика. – 2018. – N 2. - С. 6-15. – Режим доступу: DOI : 10.15588/1607-6761-2018-2-1.
- [13] Ландау, Л. Д. Теоретическая физика. Т. 2 Теория поля [Текст] / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – М.: Наука, 1988. – 59 с.
- [14] Матвеев, А. Н. Электричество и магнетизм [Текст] / А. Н. Матвеев. – М.: Высш. школа, 1983. – 463 с.
- [15] Yarymbash D. An error estimation of the current sensors of the automated control system of the technological process of graphitation [Text] / D. Yarymbash, M. Kotsur, S. Yarymbash, M. Kylymnyk IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS), 10-14 September, Kharkiv, Ukraine, 2018, pp. 64-69 DOI: 10.1109/IEPS.2018.8559489
- [16] Shuhong, Wang. A new parametric finite element analysis software for electrical machine electromagnetic fields and its implementation [Text] / Wang Shuhong, Li Qingfu, Qiu Jie, Shi Shan // ICEMS'2001. Proceedings of the Fifth International Conference on Electrical Machines and Systems (IEEE Cat. No.01EX501), Shenyang, China, 2001. - pp. 1098-1101 vol.2.doi: 10.1109/ICEMS.2001.971869
- [17] Черных, И. В. Решение полевых задач с помощью программы ELCUT 4.2 [Текст] / И. В. Черных. – Екатеринбург: Изд-во УГТИ-УПИ, 2002. – 23 с.
- [18] Kotsur, M. Improving efficiency in determining the inductance for the active part of an electric machine's armature by methods of field modeling [Electronic Resource] / M. Kotsur, D. Yarymbash, I. Kotsur, S. Yarymbash // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2019. – Vol. 6, № 5 (102). – pp. 39-47. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.185136
- [19] Бида, В. В. К расчету токоведущих систем, образованных контурами сложной геометрии [Текст] / В. В. Бида, Ю. М. Васецкий, С. В. Захарченко // Известия ВУЗов. Электромеханика. – 1990. – №6. – С. 19-21.
- [20] Васецкий, Ю. М. К расчету магнитного поля пространственных контуров с током [Текст] / Ю. М. Васецкий, Ю. П. Ковбасенко // Известия ВУЗов. Электромеханика. – 1987. – №5. – С. 28–32.
- [21] Васецкий, Ю. М. Поверхностный эффект в массивном проводнике, образующем плоский контур [Текст] / Ю. М. Васецкий // Техническая электродинамика. – 1989. – №12. – С. 72–74..
- [22] Васецкий, Ю. М. Приближенный метод расчета поля внутри и в окрестности проводника плоского контура [Текст] / Ю. М. Васецкий // Техническая электродинамика. – 1987. – №4. – С. 5–7.
- [23] Калантаров, П. Л. Расчет индуктивностей [Текст]: справочная книга / П. Л. Калантаров, Л. А. Цейтлин. – [3-е изд.]. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 488 с.
- [24] Цейтлин, Л. А. Индуктивности проводов и контуров [Текст] / Л. А. Цейтлин. – М.: Госэнергоиздат, 1950. – 228 с.
- [25] МЭК (61000-3-12:2004) Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-12: Limits - Limits for harmonic currents produced by equipment connected to public low-voltage systems with input current > 16 A and ≤ 75 A per phase
- [26] Марков, Б. Л. Физическое моделирование в металлургии [Текст] / Б. Л. Марков, А. А. Кирсанов. – М.: Металлургия, 1984. – 119 с.
- [27] Демирчан, К.С. Моделирование магнитных

- полей [Текст] / К.С. Демирчан. – Ленинград: Энергия. 1974. – 288 с.
- [28] Буль, О.Б. Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов. Программа ANSYS Учебное пособие для студентов вузов [Текст] / О.Б. Буль. – М.: Академия, 2006. – 288с.
- [29] Yarymbash D. Electromagnetic Properties Determination of Electrical Steels [Electronic Resource] / D. Yarymbash, M. Kotsur, S. Yarymbash, I. Kylymnyk, T. Divchuk // IEEE: 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), February 25-29, Lviv-Slavske, Ukraine, 2020, pp. 185-189. DOI: 10.1109/TCSET49122.2020.235419
- [30] Яримбаш, Д. С. Особенности трехмерного моделирования электромагнитных полей асинхронного двигателя [Текст] / Д. С. Яримбаш, М. И. Коцур, С. Т. Яримбаш, И. М. Коцур // Электротехника та електроенергетика – 2016. – №2 – С. 43 – 50. DOI: <http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2016-2-5>
- [31] Yarymbash, D. S. Computer simulation of electromagnetic field with application the frequency adaptation method [Text] / D. S. Yarymbash, S. T. Yarymbash, M. I. Kotsur, D. O. Litvinov // Radio Electronics, Computer Science, Control. – 2018. – № 1. – P. 65-74. – Way of Access: DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2018-1-8>
- [32] Yarymbash, D. Parameters Determination of the Trolley Busbars by Electromagnetic Field Simulation [Text] / D. Yarymbash, M. Kotsur, Yu. Bezverkhnia, I. Kotsur // IEEE: 2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS), September 10-14, Kharkiv, Ukraine, 2018, pp. 76-79. DOI: 10.1109/IEPS.2018.8559576
- [33] Kotsur, M. Determination of a busbar's parameters by electromagnetic field simulation [Text] / M.I. Kotsur, D.S. Yarymbash, Yu.S. Bezverkhnya, I.M. Kotsur // 2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP), Kremenchuk, Ukraine, 2020, pp. 1-4, doi: 10.1109/PAEP49887.2020.9240811
- [34] Paoli, G. Complex representation in nonlinear time harmonic eddy current problems [Text] / G. Paoli, O. Biro, G. Buchgraber // Transactions on Magnetism. – 1998. – Volume 34. – Issue: 5. – p. 2625 – 2628.
- [35] H. Koeppl G. Paoli Non-linear modeling of a broadband SLIC for ADSL-Lite-over-POTS using harmonic analysis [Text] / H. Koeppl G. Paoli, 2002 IEEE International Symposium on Circuits and Systems. Proceedings (Cat. No.02CH37353), August, Phoenix-Scottsdale, AZ, USA, 2002, pp. II-II, doi: 10.1109/ISCAS.2002.1010942.
- [36] Junwei Lu Harmonic balance methods used in computational electromagnetics. harmonic balance finite element method: applications in nonlinear electromagnetics and power systems [Text]. Lu Junwei, Zhao Xiaojun, Yamada Sotoshi. - John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd. - 2016. — 304 p.
- [37] Junwei, Lu Nonlinear electromagnetic field and its harmonic problems in harmonic balance finite element method: applications in nonlinear electromagnetics and power systems [Text] / Lu Junwei, Zhao Xiaojun, Yamada Sotoshi // Wiley-IEEE Press. – 2016.- №1. - pp. 19-59.
- [38] Stockreiter C. transfinite element method using the v-potential formulation with edge elements in the frequency domain [Text] / C. Stockreiter // IEEE Transactions on Magnetism. – 2007. - vol. 43. - №. 4. - pp. 1349-1352. doi: 10.1109/TMAG.2006.891008.
- [39] Gerhard Paoli Oszkar Biro Time harmonic eddy currents in non-linear media [Text] / P, Gerhard, B. Oszkar // «COMPEL» – The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering. – 1997. - Vol. 17. - issue № 5. - pp. 567-575.
- [40] Измайлов, С. В. Курс Электродинамики [Текст]: для физико-математических факультетов педагогических вузов / С. В. Измайлов. – М: Гос. Учебн-педагог. Изд-во мин. просвещ. РСФСР, 1962. – 440с.
- [41] Kotsur, M. Improving efficiency in determining the inductance for the active part of an electric machine's armature by methods of field modeling [Electronic Resource] / M. Kotsur, D. Yarymbash, I. Kotsur, S. Yarymbash // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2019. – Vol. 6. - № 5 (102). – pp. 39-47. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.185136.

*Стаття надійшла до редакції 19.12.2020*



## ОСОБЕННОСТИ ПОЛЕВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ ТРОЛЛЕЙНЫХ ШИНОПРОВОДОВ

- КОЦУР М.И. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры электрических и электронных аппаратов Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина, e-mail: kotsur8@gmail.com;
- ЯРЫМБАШ Д.С. д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой электрических машин Запорожского национального университета, Запорожье, Украина, e-mail: yarymbash@gmail.com;
- БЕЗВЕРХНЯЯ Ю.С. аспирант кафедры электрических и электронных аппаратов Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина e-mail: juliaeee@ukr.net;
- ДИВЧУК Т.Ю. канд. техн. наук, доцент кафедры электрических машин НУ «Запорожская политехника», Запорожье, Украина, e-mail: tetiana.divchuk@gmail.com;

**Цель работы.** Исследование и анализ параметров троллейных шинопроводов, в условиях действия высших гармонических составляющих тока, с учетом конструктивных особенностей, нелинейности магнитных и электрофизических свойств материалов, эффектов близости, поверхностных и внешних поверхностных эффектов.

**Методы исследования.** Исследования проводились с применением методов теории электромагнитного поля, теории электрических цепей, математической физики, конечных элементов, интерполяции, аппроксимации и регрессионного анализа.

**Полученные результаты.** Разработана математическая пространственная модель электромагнитных процессов в стальном троллейном шинопроводе во временной постановке задачи распределения электромагнитного поля. Получены зависимости распределения эквипотенциальных линий результирующей z-составляющей вектора магнитного потенциала вдоль шинопровода, а также распределения результирующей нормальной составляющей магнитной индукции и напряженности магнитного поля в поперечном (XY) сечении при несинусоидальном токе в троллеях шинопровода. Доказано, что вдоль длины шинопровода, в поперечном их пересечении, магнитное поле стремится к плоско-параллельной форме. Невязка модуля векторного магнитного потенциала вдоль длины шинопровода не превышает 0,9-1,2%. Для уменьшения размерности задачи, вычислительных ресурсов и времени на расчет, предложена двухмерная плоско-параллельная математическая модель в частотной постановке распределения электромагнитного поля. Для учета нелинейных магнитных свойств стальных троллеев предложено определение эффективной кривой намагничивания для нелинейной двумерной задачи электромагнитного поля шинопровода. Полученные результаты верификации, по рассчитанному падению напряжения, подтверждают высокую точность расчета и достоверность полученных результатов (погрешность не превышает 1,88% ÷ 2,06%) двумерной модели в частотной постановке, по отношению к пространственной модели, в постановке задачи зависимой от времени электромагнитного поля.

**Научная новизна.** Предложена математическая двухмерная модель электромагнитных процессов в частотной постановке задачи распределения электромагнитного поля в троллейном шинопроводе, учитывающая конструктивные особенности, нелинейность магнитных и электрофизических свойств, эффекты близости, поверхностные и внешние поверхностные эффекты, влияние гармонических составляющих тока на падение напряжения и потери мощности в процессе электропередачи, которая позволяет с высокой точностью и эффективностью численной реализации определить параметры троллей шинопровода для соответствующих значений амплитуд и частот весших гармоник тока.

**Практическая ценность.** Проведена верификация по рассчитанному падению напряжения подтверждающая высокую точность расчета и достоверность полученных результатов (погрешность не превышает 1,88% ÷ 2,06%) двумерной модели в частотной постановке, по отношению к пространственной модели, в постановке задачи зависимой от времени распределения электромагнитного поля.

**Ключевые слова:** шинопровод; электромагнитное поле; 3D и 2D модель; метод, гармоники; частота, верификация.

## FEATURES OF FIELD MODELING OF ELECTROMAGNETIC PROCESSES OF TROLLEY BUSBAR

- KOTSUR M.I.** PhD, associate professor, associate professor of Electrical and Electronic Apparatuses, Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: kotsur8@gmail.com;
- YARYMBASH D.S.** D.Sc., professor, head of the department of Electrical Machines, Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: yarymbash@gmail.com;
- BEZVERKHNYA Yu.S.** postgraduate student of the department of Electrical and Electronic Apparatuses, Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: juliaeeea@ukr.net;
- DIVCHUK T.Yu.** PhD, associate professor of the department of Electrical machines, Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: tetiana.divchuk@gmail.com;

**Purpose.** Research and analysis trolley busbar's parameters in condition of higher current harmonic actions, with taking into account the structural features of nonlinearity of magnetic and electrical properties of materials, proximity effects, surface and external surface effects.

**Methodology.** The researches were carried out using the electromagnetic field theory methods, the electrical circuit theory, mathematical physics, finite elements, interpolation, approximation and regression analysis.

**Findings.** The mathematical spatial model of electromagnetic processes in a steel trolley busbar in time statement of a problem of distribution of an electromagnetic field is developed. The dependences of the distribution of equipotential lines of the resulting z-component of the magnetic potential vector along the busbar, as well as the distribution of the resulting normal component of magnetic induction and magnetic field strength in the transverse (XY) cross section at non-sinusoidal current in busbar trolleys is obtained. Along the length of the busbar, in their cross section, the magnetic field tends to a plane-parallel shape it is proved. The error of the modulus of the vector magnetic potential along the length of the busbar does not exceed 0.9-1.2%. To reduce the dimension of the problem, computational resources and calculation time, a two-dimensional plane-parallel mathematical model in the frequency setting of the electromagnetic field distribution is proposed. To take into account the nonlinear magnetic properties of steel trolleys, to determine the effective magnetization curve for the nonlinear two-dimensional problem of the electromagnetic field of the busbar it is proposed. The verification results, according to the calculated voltage drop, confirm the high accuracy of the calculation and the reliability of the obtained results (error does not exceed  $1.88\% \div 2.06\%$ ) of the two-dimensional model in the frequency setting relative to the spatial model in the problem of time-dependent electrical -magnetic field is obtained.

**Originality.** A mathematical two-dimensional model of electromagnetic processes in the frequency formulation of the problem of electromagnetic field distribution in a trolley busbar is proposed, which takes into account design features, nonlinearity of magnetic and electrophysical properties of materials, proximity effects, surface and external surface effects, influence of harmonic current components power transmission, which allows with high accuracy and efficiency of numerical implementation to determine the parameters of the bus trolleys for the corresponding values of the amplitudes and frequencies of the frequencies harmonics of the current.

**Practical value.** Verification of the calculated voltage drop confirms the high accuracy of the calculation and the reliability of the results (error does not exceed  $1.88\% \div 2.06\%$ ) of the two-dimensional model in the frequency reference relative to the spatial model in the problem of time-dependent electromagnetic field distribution is performed.

**Keywords:** busbar; electromagnetic field; 3D and 2D model; method; harmonics; frequency, verification.

### REFERENCES

- [1] Yarymbash, D., Kotsur, M., Yarymbash, S., Kotsur, I. (2016). Osobennosti trekhmernogo modelirovaniya elektromagnitnykh polej asinkhronnogo dvigatelya. Elektrotehnika ta elektroenergetika, 2, 43 – 50. DOI: <http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2016-2-5>
- [2] Yarymbash, D., Kotsur, M., Subbotin, S., Olinyk, A. (2017) New simulation approach of the electromagnetic fields in electrical machines. IEEE: The International Conference on Information and Digital Technologies. Catalog Number CFP17CDT-USB. 452-457. DOI: 10.1109/DT.2017.8024332 (in English).
- [3] Yarymbash, D., Yarymbash, S., Kotsur, M., Divchuk, T. (2018). Analysis of inrush currents of the unloaded transformer using the circuit-field modelling methods. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3, 5 (93), 6-11. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.134248

- (in English).
- [4] Jiang, B., Wu, J., Povinelli, L. (1996). The origin of spurious solutions in computational electromagnetics, *Comput. Phys*, 125, 104–123.
- [5] Yarymbash, D., Kotsur, M., Bezverkhnia, Yu., Kotsur I. (2018). Parameters determination of the trolley busbars by electromagnetic field simulation. *IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*, 76-79. DOI: 10.1109/IEPS.2018.8559576 (in English).
- [6] Yarymbash, D., Kotsur, M., Yarymbash, S., Divchuk, T. (2018). Electromagnetic parameters determination of power transformers. *IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*, 70-75. DOI: 10.1109/IEPS.2018.8559573 (in English).
- [7] Yarymbash, D., Kotsur, M., Yarymbash, S., Divchuk, T. (2019). Hysteresis and eddy currents effects simulation in idling mode of the transformer. *Problemele energeticii regionale*, 39, 12-21. –DOI: 10.5281/zenodo.2650413. (in English).
- [8] Bessonov, L. (2003). Teoreticheskie osnovy elektrotehniki. *Elektromagnitnoe pole tokov, magnitnogo polya. Vysshaya shkola*, 317 (in Russian).
- [9] Demirchan, K., Demirchan, V., Chechurin L. (1986). Mashinnye raschety elektromagnitnykh polej, *Vysshaya shkola*, 240. (in Russian)
- [10] Roskopf, A., Bar, E., Joffe, C. (2014). Influence of linner skin- and proximity effects on conduction in litz wires. *IEEE Trans. Power Electron.*, 29, 10, 5454–5461, DOI: 10.1109/TPEL.2013.2293847 (in Russian).
- [11] Filippov, I. (1986) *Teploobmen v elektricheskikh mashinakh: ucheb. pos. dlya vuzov. Energoatomizdat*, 256. (in Russian)
- [12] Divchuk, T., Yarymbash, D., Yarymbash, S., Kylymnyk, I., Kotsur, M., Bezverkhnia, Y. (2018). Ytochyuyuchy pidhid do vyznachenya funkcional'nykh zalezhnostey vidnosnykh magnitnykh pronykhnostey anizotropnykh kholodnokatannykh staley (An adjusting approach to the determination of the permeability functional dependencies of anisotropic cold-rolled electrotechnical steels). *Electrical Engineering And Power Engineering*, 2, 6-15. doi:http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2018-2-1 (in Ukrainian).
- [13] Landau, L. D. Lifshicz, E. M. Nauka (1988). *Teoreticheskaya fizika. T. 2 Teoriya polya*, 59. (in Russian)
- [14] Matveev, A. N. (1983). *Elektrichestvo i magnetizm. Vysshaya shkola*, 463. (in Russian)
- [15] Yarymbash D., Kotsur M., Yarymbash S., Kylymnyk M. (2018). An error estimation of the current sensors of the automated control system of the technological process of graphitiation. *IEEE: 2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*, 64-69. DOI: 10.1109/IEPS.2018.8559489 (in English).
- [16] Shuhong, Wang., Qingfu, Li, Jie Qiu, Shan Shi (2001). A new parametric finite element analysis software for electrical machine electromagnetic fields and its implementation. *ICEMS'2001. Proceedings of the Fifth International Conference on Electrical Machines and Systems (IEEE Cat. No.01EX501)*, 2, 1098-1101 doi: 10.1109/ICEMS.2001.971869.
- [17] Chernykh, I. V., (2002) *Reshenie polevykh zadach s pomoshhyu programmy ELCUT 4.2 Izdatelstvo UGTI-UIPI*, 23. (in Russian)
- [18] Kotsur, M., Yarymbash, D., Kotsur, I., Yarymbash, S. (2019). Improving efficiency in determining the inductance for the active part of an electric machine's armature by methods of field modeling. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6, 5 (102), 39-47. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.185136 (in English).
- [19] Bida, V., Vaseczkij, Yu., Zakharchenko, S. (1990). *K raschetu tokovedushhikh sistem, obrazovannykh konturami slozhnoj geometrii. Izvestiya VUZov. Elektromekhanika*, 6, 19-21. (in Russian).
- [20] Vaseczkij, Yu., Kovbasenko, Yu. (1987). *K raschetu magnitnogo polya prostranstvennykh konturov s tokom. Izvestiya VUZov. E'lektromekhanika*, 5, 28–32. (in Russian).
- [21] Vaseczkij, Yu. M., (1989). *Poverkhnostnyj effekt v massivnom provodnike, obrazuyushhem ploskij kontur. Tekhnicheskaya elektrodinamika*, 12, 72–74. (in Russian).
- [22] Vaseczkij, Yu. M. (1987). *Priblizhennyj metod rascheta polya vnuti i v okrestnosti provodnika ploskogo kontura. Tekhnicheskaya e'lektrodinamika*, 4, 5–7. (in Russian).
- [23] Kalantarov, P. L., Czejtlin, L. A. (1986). *Raschet induktivnostej: spravochnaya kniga. Energoatomizdat*, 488. (in Russian).
- [24] Czejtlin, L. A. (1950). *Induktivnosti provodov i konturov. Gose`nergoizdat*, 228. (in Russian).
- [25] МЭК (61000-3-12:2004) *Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-12: Limits - Limits for harmonic currents produced by equipment connected to public low-voltage systems with input current > 16 A and ≤ 75 A per phase IEC (61000-3-12: 2004) Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Ogranichenie garmonicheskikh sostsvlyaiushikh toka, sozdavaemykh*

- tekhnicheskimi sredstvami potrebyaemymy tokom bolee 16A, no ne bolee 75A (v odnoy faze), podkluchaemykh k nizkovol'nym sistemam electrosnabzheniya obshshego naznacheniya. Normy i metody ispytaniy. (Electromagnetic compatibility of technical means. Limit of harmonic current components created by technical means with a current consumption of more than 16 A, but not more than 75 A (in one phase), connected to low-voltage general-purpose power systems. Norms and methods of testing). (in Russian).
- [26] Markov, B. L. (1984). Fizicheskoe modelirovanie v metallurgii. Metallurgiya, 119. (in Russian).
- [27] Demirchan, K.S. (1974). Modelirovanie magnitnykh polej. E'nergiya, 288. (in Russian).
- [28] Bul', O.B. (2006). Metody rascheta magnitny'kh sistem elektricheskikh apparatov. Programma ANSYS Uchebnoe posobie dlya studentov vuzov. Akademiya, 288. (in Russian).
- [29] Yarymbash, D., Kotsur, M., Yarymbash, S., Klymnyk, I., Divchuk, T. (2020). Electromagnetic Properties Determination of Electrical Steels [Electronic Resource]. IEEE: 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), 185-189. DOI: 10.1109/TCSET49122.2020.235419 (in English).
- [30] Yarymbash, D., Kotsur, M., Yarymbash, S., Kotsur, I. (2016). Osobennosti trekhmernogo modelirovaniya elektromagnitnykh polej asinkhronnogo dvigatelya. Elektrotekhnika ta elektroenergetika, 2, 43–50. DOI: <http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2016-2-5> (in Russian).
- [31] Yarymbash, D., Yarymbash, S., Kotsur, I., Litvinov, D. (2018). Computer simulation of electromagnetic field with application the frequency adaptation method. Radio Electronics, Computer Science, Control, 1, 65-74. –DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2018-1-8> (in English).
- [32] Yarymbash, D., Kotsur, M., Bezverkhnia, Yu., Kotsur, I. (2018). Parameters Determination of the Trolley Busbars by Electromagnetic Field Simulation. IEEE: 2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS), 76-79. DOI: 10.1109/IEPS.2018.8559576 (in English).
- [33] Kotsur, M., Yarymbash, D., Bezverkhnia, Yu., Kotsur, I. (2020). Determination of a busbar's parameters by electromagnetic field simulation. IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP), 1-4, doi: 10.1109/PAEP49887.2020.9240811. (in English).
- [34] Paoli, G., Biro, G., Buchgraber, O. (1998). Complex representation in nonlinear time harmonic eddy current problems. Transactions on Magnetics, 34, 5, 2625 – 2628. (in English).
- [35] Koepl, H., Paoli, G. (2002). Non-linear modeling of a broadband SLIC for ADSL-Lite-over-POTS using harmonic analysis. IEEE International Symposium on Circuits and Systems. Proceedings (Cat. No.02CH37353. II-II, doi: 10.1109/ISCAS.2002.1010942. (in English).
- [36] Junwei, Lu., Xiaojun, Zhao, Sotoshi, Yamada (2016). Harmonic balance methods used in computational electromagnetics. harmonic balance finite element method: applications in nonlinear electromagnetics and power systems. John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd, 304. (in English).
- [37] Junwei, Lu., Xiaojun, Zhao, Sotoshi, Yamada (2016). Nonlinear electromagnetic field and its harmonic problems in harmonic balance finite element method: applications in nonlinear electromagnetics and power systems. Wiley-IEEE Press, 1, 19-59. (in English).
- [38] Stockreiter, C. (2007). Transfinite element method using the v-potential formulation with edge elements in the frequency domain. IEEE Transactions on Magnetics, 43, 4, 1349-1352. doi: 10.1109/TMAG.2006.891008. (in English).
- [39] Paoli, G., Biro, O. (1997). Time harmonic eddy currents in non-linear media. «COMPEL» – The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering, 17, 5, 567-575. (in English).
- [40] Izmajlov, S. V. (1962). Kurs Elektrodinamiki: dlya fiziko-matematicheskikh fakul'tetov pedagogicheskikh vuzov. Gos. Uchebn-pedagog. Izdatel'stvo ministerstva prosveshheniya RSFSR, 440. (in Russian).
- [41] Kotsur, M., Yarymbash, D., Kotsur, I., Yarymbash, S. (2019). Improving efficiency in determining the inductance for the active part of an electric machine's armature by methods of field modeling [Electronic Resource]. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6, 5 (102), 39-47. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.185136. (in English).

## ПІДХОДИ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ТІЛА ЛЮДИНИ БЕЗКОНТАКТНИМИ ІЧ ТЕРМОМЕТРАМИ

- ФУРМАНОВА Н.І.** канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри інформаційних технологій електронних засобів Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: nfulmanova@gmail.com;
- ФАРАФОНОВ О.Ю.** канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри інформаційних технологій електронних засобів Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: farafon@zntu.edu.ua;
- МАЛИЙ О.Ю.** канд. техн. наук, доцент кафедри інформаційних технологій електронних засобів Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: docsasha2@gmail.com;
- ПІРОЖЕНКО О.О.** аспірант кафедри інформаційних технологій електронних засобів Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна

**Мета роботи:** проаналізувати існуючі підходи вимірювання температури тіла людини, запропонувати підходи для підвищення точності вимірювання.

**Методи дослідження:** аналітичний, експериментальний.

**Отримані результати.** У статті розглянуто підходи до підвищення точності вимірювання температури тіла безконтактними інфрачервоними термометрами. Проаналізовано параметри інфрачервоних вимірювачів температури. Запропоновано склад системи для збору статистичної інформації щодо впливу факторів навколишнього середовища на точність вимірювань. Запропоновано програмне забезпечення для проведення досліджень. Наведено статистичні дані вимірювань. Вказано шляхи підвищення точності вимірювань безконтактними інфрачервоними термометрами. Запропоновані математичне та фізичне забезпечення безконтактного вимірювання температури, проведений аналіз параметрів інфрачервоних вимірювачів температури тіла, розроблено систему для отримання статистичної інформації для виявлення факторів впливу, проведено аналіз результатів.

**Наукова новизна.** Запропоновано уточнену формулу для визначення температури тіла, що містить такі параметри: специфічна стала для окремого пристрою, що залежить від оптичної системи фокусування та поглинаючого матеріалу; ступінь випромінювання об'єкта, що залежить від матеріалу об'єкту, температура якого вимірюється; абсолютна температура об'єкта, що вимірюється; абсолютна температура зовнішнього середовища; відбите випромінювання зовнішнього середовища; абсолютна температура корпусу датчика пірометра.

**Практична цінність.** В роботі запропоновані рекомендації, що здатні в значній мірі підвищити точність вимірювань при проектуванні систем, що містять інфрачервоні термометри.

**Ключові слова:** термометрія; інфрачервоний; точність; статистичні вимірювання; похибка

### I. ВСТУП

Вимірювання температури тіла звичайними контактними методами займає досить багато часу, додатково потребує безпосереднього контакту вимірювального приладу з пацієнтом, який може бути заразним, що призведе до поширення вірусної інфекції.

Особливо гостро постало питання швидкого вимірювання температури тіла на пропускних пунктах підприємств різних сфер економіки. Вимірювання температури було впроваджено задля запобігання розповсюдженню вірусної інфекції у великих колективах людей. Контактні способи вимірювання для даного завдання не дуже добре підходять через порівняно високий час вимірювання, що в свою чергу упо-

вільнює пропускну процес на підприємствах.

При поширенні коронавірусної інфекції COVID-19 широке застосування знайшли безконтактні (інфрачервоні) термометри [1], які мають безліч переваг.

Переваги дистанційного виміру температури тіла:

1) Дистанція. Залежно від завдання використовують апаратуру, яка дозволяє зчитувати температуру тіла на достатній відстані від людини (до 2 м). Обстеження проходить без контакту і значної зупинки руху - таке рішення підходить для масової перевірки без затворів.

2) Візуалізація результатів. Апаратура автоматично виводить параметри на дисплей і на екран комп'ютера, підсвічує зображення людей з підвищеною

температурою.

3) Сповіщення. Залежно від налаштувань електронного дистанційного вимірювача, при виявленні небезпеки прилад для вимірювання температури тіла людини на відстані відправляє оповіщення на пульт служби охорони, блокує прохід, включає сигнал тривоги.

Загалом: прилад для вимірювання температури тіла людини на відстані показує досить точну інформацію, допомагає виявити людей з симптомами коронавірусу і інших захворювань, працює як датчик охоронної мережі. При спрацьовуванні відомості збираються в системі.

## II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

Вимірювання температури безконтактними термометрами стало масовим явищем та викликає значний інтерес у інтернет спільноти. Давно відомо, що вплив зовнішніх факторів може призвести до значних відхилень при вимірюванні [2]. За час пандемії вимірювання температури тіла безконтактними методами перейшло з медичної сфери у кожний заклад суспільного призначення, а термографія у медицині розвивається швидкими темпами [3]. Методи пірометрії та розробка точних пристроїв вимірювання температури – об'єкт постійної уваги вчених та інженерів [4], [5], [6], але вплив сучасних реалій та вимоги щодо протидії поширення covid19 призводять до зміщення інтересу наукової спільноти з промислового застосування безконтактних вимірювачів температури у область вимірювання температури тіла людини [7], [8], [9]. Окремим напрямком досліджень та застосуванням у медичних цілях є радіотермометрія для внутрішніх органів [10], [11], [12]. Однак існує ще досить великий розрив між роботами біомедичного спрямування та наробітками в галузі промислового застосування безконтактних вимірювачів. В першу чергу, це пов'язано зі складною динамічною багаточисловою структурою, якою для вимірювачів є людина. По-друге, виникають прогалини стосовно метрологічного забезпечення проведення вимірювань.

## III. МЕТА РОБОТИ

У табл.1 наведено порівняння різних методів вимірювання температури тіла людини за такими характеристиками як точність вимірювання та швидкість вимірювання. З табл. 1 видно, що найточнішим методом вимірювання є вимірювання контактним методом за допомогою ртутного градусника, а найшвидшим – вимірювання за допомогою стаціонарного тепловізора. Однак використання ртутного градусника потребує контакту з тілом ймовірно зараженої людини та швидкість вимірювання низька. Використання стаціонарного тепловізора хоча й має високу швидкість, але найчастіше недоступне для більшості підприємств з причин великої ціни. Отже, оптимальним методом вимірювання, що забезпечує достатню шви-

дкість, має відсутність безпосереднього контакту з тілом та при цьому має доступну для будь-якого підприємства вартість, є використання пірометрів.

Точність вимірювання 0,5°C при визначенні температури тіла людини не може повністю гарантувати відсутність перевищення межових показників здорової людини, а отже існує проблема підвищення точності вимірювання пірометрами [13]. Задачами дослідження є виявлення факторів, що впливають на точність вимірювання інфрачервоними безконтактними термометрами та пропонування підходів для мінімізації цих впливів, що дозволить підвищити точність вимірювання з метою забезпечення точного розуміння чи знаходиться температура тіла людини в межах здорового стану.

**Таблиця 1.** Показники точності та швидкості вимірювання температури різними типами пристроїв

Пристрій	Точність вимірювання, °C	Швидкість вимірювання
Ртутний градусник	0,1	1 людина за 10 хвилин
Електронний градусник	0,2	>1 людини за 1 хвилину
Пірометр	0,5	1 людина за 2 секунди
Ручний тепловізор	1	1 людина за 2-3 секунди
Стаціонарний тепловізор	0,3	за 0,5 секунди до 30 людей одразу

## IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ ТА АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

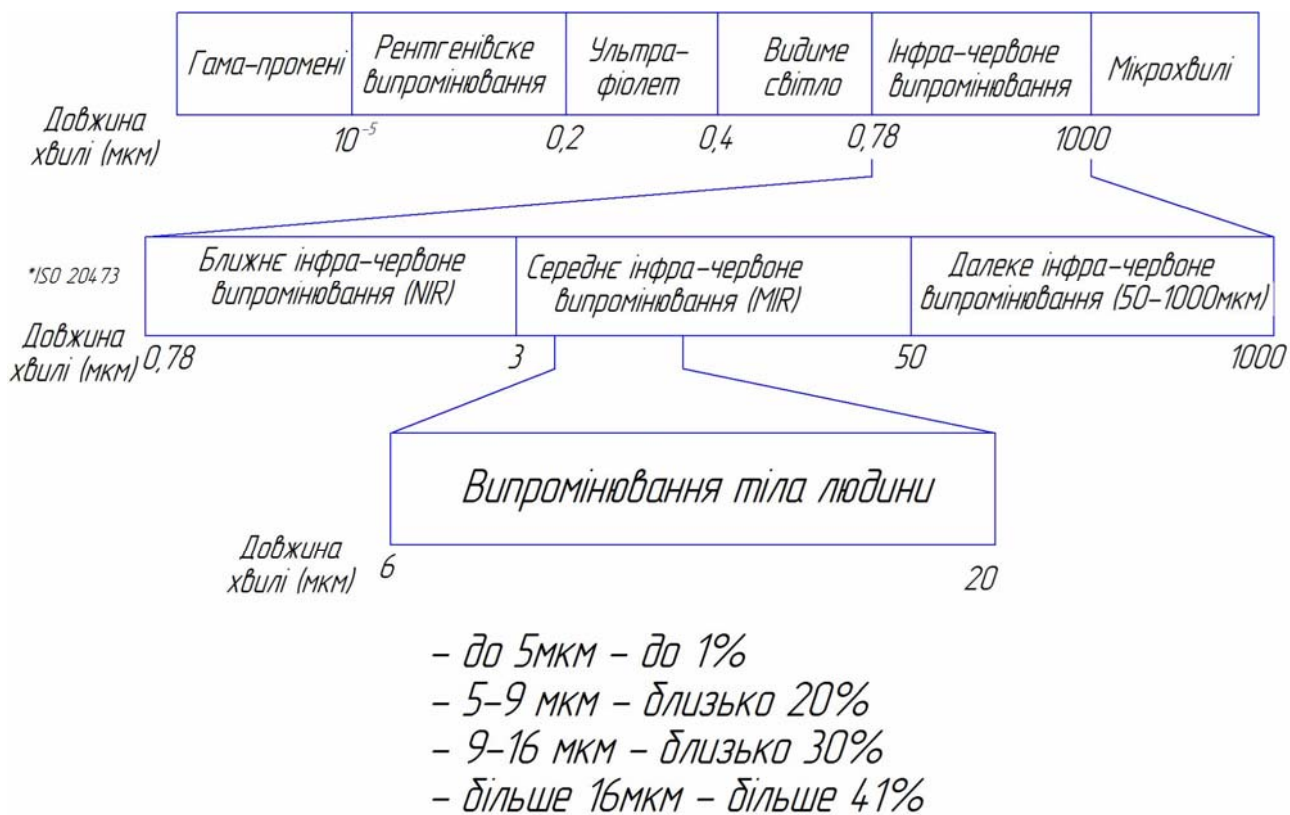
### Математичне та фізичне забезпечення безконтактного вимірювання температури

Для розуміння від чого залежить точність вимірювання безконтактним методом ІЧ термометрії було проведено аналіз типової структури методу, фізичних та математичних основ вимірювань.

Будь-яке нагріте тіло, що має температуру вище абсолютного нуля (273К), в тому числі організм людини, випромінює електромагнітні хвилі в широкому спектрі частот [14]. Глибина ефективного вимірювання температури дорівнює товщині випромінюючого шару (скін-шар) і визначається як відстань, на яке поширюється електромагнітна хвиля від поверхні об'єкта до того шару, в якому її інтенсивність зменшується в 2,73 рази. За інших рівних умов чим більше довжина хвилі, тим більше глибина, з якою можна реєструвати температурні обурення. Максимум інтенсивності теплового радіовипромінювання при звичайній температурі навколишнього середовища лежить в

інфрачервоної області спектра (рис. 1). Це зумовило доцільність створення ІЧ термографії для дослідження температурних аномалій. Однак, вимір теплового

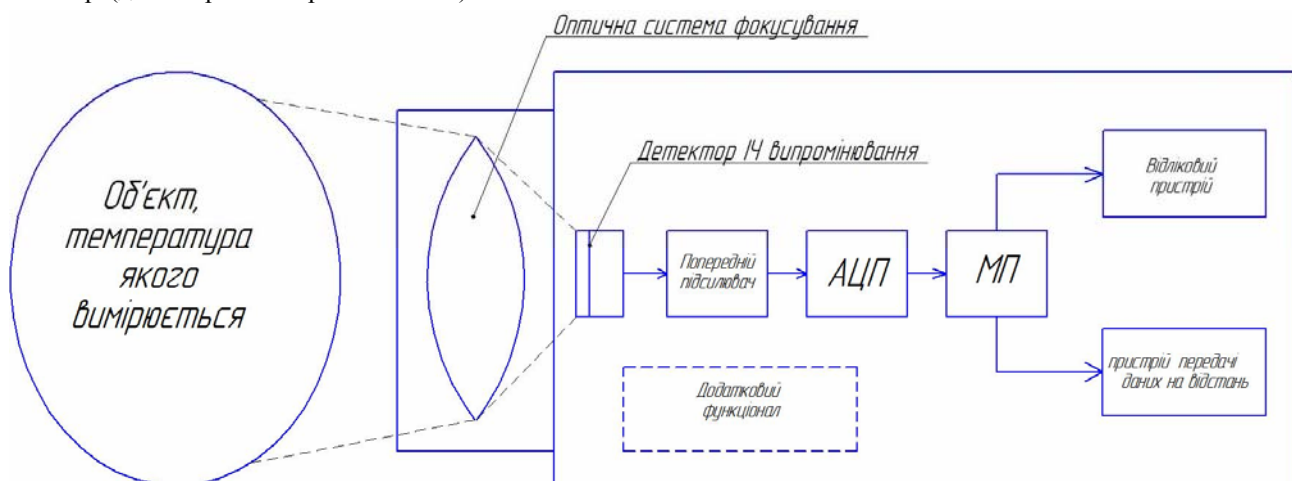
випромінювання тіла людини в ІЧ діапазоні дає справжню температуру тільки самого верхнього шару шкіри товщиною в доли міліметра.



**Рисунок 1.** Місце та розподіл інфрачервоного випромінювання тіла людини в загальному спектрі випромінювання

Отже, для вимірювання ІЧ випромінювання тіла людини використовують прилади, що мають поглинаючий шар (детектор ІЧ випромінювання) в описа-

ному вище діапазоні та загалом мають структуру, що наведена на рис. 2.



**Рисунок 2.** Типова структура ІЧ вимірювача температури тіла людини

Внаслідок надходження електромагнітного ви-

промінювання на детектор ІЧ випромінювання вини-

кає електричний сигнал, який можна точно проаналізувати. Сигнал детектора  $U$  і температура об'єкта  $T_{obj}$  мають наступний взаємозв'язок:

$$U \sim \varepsilon \cdot T_{obj}^4, \quad (1)$$

де  $U$  – сигнал детектора;

$\varepsilon$  – ступінь випромінювання об'єкта, що залежить від матеріалу об'єкту, температура якого вимірюється;

$T_{obj}$  – абсолютна температура об'єкта, що вимірюється.

Оскільки необхідно враховувати разом зі ступенем випромінювання  $\varepsilon$  об'єкта і відбите випромінювання навколишнього середовища на поверхню об'єкта  $T_{amb}$  і власне випромінювання інфрачервоного термометра  $T_p$  ( $C$  – специфічна для пристрою постійна), формула змінюється наступним чином:

$$U = C \cdot (\varepsilon \cdot T_{obj}^4 + (1 - \varepsilon) T_{amb}^4 - T_p^4), \quad (2)$$

де  $C$  — специфічна стала для окремого пристрою, що залежить від оптичної системи фокусування та поглинаючого матеріалу;

$\varepsilon$  – ступінь випромінювання об'єкта, що залежить від матеріалу об'єкту, температура якого вимірюється;

$T_{obj}$  – абсолютна температура об'єкта, що вимірюється;

$T_{amb}$  – абсолютна температура зовнішнього середовища;

$(1 - \varepsilon) T_{amb}^4$  – відбите випромінювання зовнішнього середовища;

$T_p$  – абсолютна температура корпусу датчика пірометра.

До того ж, інфрачервоні термометри працюють не в загальному спектрі випромінювання. Показник ступеня  $n$  залежить від довжини хвилі. Показник  $n$  для довжин хвиль від 5 до 16 мкм знаходиться в діапазоні 7...2:

$$U = C \cdot (\varepsilon \cdot T_{obj}^n + (1 - \varepsilon) T_{amb}^n - T_p^n). \quad (3)$$

Температура об'єкта розраховується за допомогою перестановки останньої формули. Результати розрахунків для всіх зустрічаються значень температури в вигляді сімейства кривих зберігаються в пам'яті постійній пам'яті інфрачервоного термометра:

$$T_{obj} = \sqrt[n]{\frac{U - C \cdot T_{amb}^n + C \cdot \varepsilon T_{amb}^n + C \cdot T_p^n}{C \varepsilon}}. \quad (4)$$

Інфрачервоні термометри отримують досить сигналу для вимірювання температури. Виходячи з рівнянь видно, що поряд з областю довжини хвилі (спектр випромінювання) важливе значення має і відбите випромінювання навколишнього середовища і коефіцієнт випромінювання, коли потрібно точно визначити температуру [15].

Аналізуючи наведені співвідношення, можна зробити висновок, що точність визначення температури тіла залежить від:

- поглинаючого матеріалу приладу;
- оптичної системи приладу;
- температури навколишнього середовища;
- температури корпусу пірометра.

Однак, враховуючи, що ми маємо справу з вимірюванням одного й того самого матеріалу (шкіри людини), точність не буде залежить від ступеню випромінювання об'єкта ( $\varepsilon$ ).

Отже, пропонується під час проектування безконтактних ІЧ приладів термометрії тіла людини:

- 1) використовувати поглинаючі матеріали з піковим поглинанням у спектрі, що відповідає найбільшій інтенсивності випромінювання тіла людини (16 мкм);
- 2) використовувати якісну оптичну систему з матеріалів, що мають максимальну пропускну спроможність у спектрі випромінювання тіла людини;
- 3) при проведенні калібрування та подальших вимірюваннях додатково вимірювати температури навколишнього середовища та температуру корпусу пірометра з внесенням відповідних коректувань в показання приладу вимірювання температури тіла.

### Аналіз параметрів інфрачервоних вимірювачів температури тіла

Наступним етапом виявлення шляхів підвищення точності безконтактної ІЧ термометрії було проведено аналіз конструктивних особливостей пірометрів (табл. 2).

Основними показниками ручних пірометрів є:

- точність вимірювання;
- кут огляду (FOV);
- наявність контактної датчика (термопар) для калібрування;
- наявність лазерного цілевказувача;
- можливість запису фото / відео процесу вимірювання;
- наявність і спосіб передачі даних на ПК;
- реєстрація та утримання даних на дисплеї.

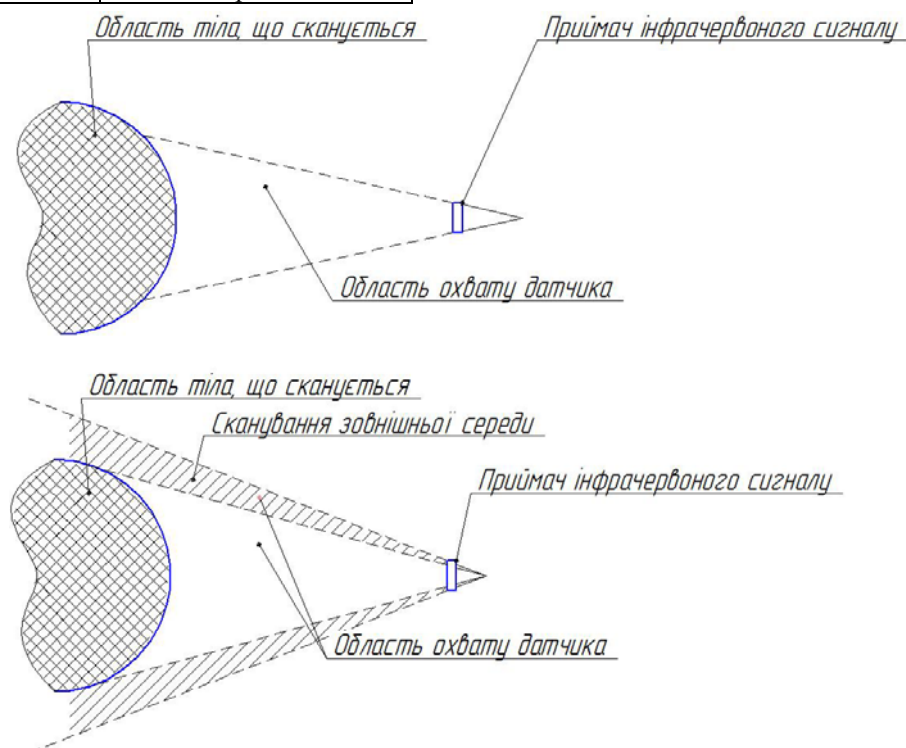


**Таблиця 2.** Основні показники безконтактних систем вимірювання температури

Основні параметри ручних пірометрів	Основні параметри автоматизованих систем термометрії тіла
точність вимірювання	точність вимірювання
кут огляду (FOV)	частина тіла, для якої проводиться вимір
наявність контактного датчика (термопари) для калібрування	наявність, тип та точність датчиків відстані до шкіри при вимірюванні
наявність лазерного цілевказувача	габаритні розміри
можливість запису фото / відео процесу вимірювання	можливість запису фото / відео процесу вимірювання
наявність і спосіб передачі даних на ПК	спосіб передачі даних на ПК, додаткові інтерфейси передачі даних
реєстрація та утримання даних на дисплеї	наявність звукової, світлової індикації, дисплея в корпусі
дистанція вимірювання	можливість управління турнікетами і іншими силовими пристроями для пропуску на територію

Точність вимірювання ручних пірометрів температури тіла коливається, як правило, від 0,02°C до 0,2°C. Однак, слід зазначити, що це лише заявлений крок поділки приладу, а реальна точність з урахуванням дозвільних параметрів первинного перетворювача (інфрачервоного приймача та АЦП) коливається в межах 0,1-0,5°C в залежності від якості виконання оптичної системи фокусування інфрачервоного випромінювання і розрядності АЦП.

Кут огляду оптичної системи фокусування (FOV - Field Of View) миттєве поле зору - стягуваний кут, в межах якого вимірювальний прилад збирає променисту енергію на один чутливий елемент, або кутова проекція чутливого елемента на поверхню об'єкта вимірювання. Даний параметр грає роль для можливої дальності проведення вимірювань. При великому куті отримується випромінювання фокусується з більшої площі, а отже, можливе захоплення випромінювання не тільки з частини тіла, а й з навколишніх об'єктів, тому вимірювальна пляма при цьому зростає. Порівняння охоплення частини тіла, що сканується датчиком з маленьким і великим кутом стягнення (рис. 3). Отже для гарантування, що вимірювання буде охоплювати лише шкіру людини, а не оточуюче середовище для вимірювання температури тіла людини краще використовувати датчики з якомога меншим кутом фокусування [16].



**Рисунок 3.** Порівняння датчиків з різним FOV

Інші технічні (але не конструктивні) показники не впливатимуть на точність вимірювання, а впливають лише на зручність користування.

До конструктивних параметрів, що впливатимуть на точність вимірювання температури, можна віднести:

- якість оптичної системи фокусування;
- якість та тип матеріалу детектора ІЧ випромінювача;
- якість попереднього підсилювача;
- параметри АЦП (швидкість перетворення, розрядність, фільтрація шумів).

На якість оптичної системи, в першу чергу, буде впливати матеріал, з якого виготовлено лінзу.

Основними оптичними та іншими фізико-механічними параметрами і характеристиками матеріалів лінз є:

- спектральне пропускання або відбивання;
- показник заломлення;
- дисперсія;
- зміна коефіцієнта пропускання і показника заломлення при зміні температури;
- щільність;
- твердість;
- теплопровідність;
- коефіцієнт термічного розширення;
- теплоємність;
- модуль пружності;
- температури розм'якшення і плавлення;
- стійкість до впливу різних середовищ.

До матеріалів, що пропускають у спектрі випромінювання тіла людини (пікове значення 16 мкм) відносяться наступні матеріали [17]:

- германій (полоса пропускання 1,8...17 мкм);
- телурид кадмію «Іртран-6» (полоса пропускання 1,5...26 мкм);
- селенід цинку «Іртран-4» (полоса пропускання 0,55...21 мкм).

Інші матеріали хоча й пропускають в ІЧ спектрі, однак або їх смуга пропускання або зовсім не попадає в пікову смугу випромінювання тіла людини, або знаходяться на границі цієї зони.

Також важливим у нашому випадку буде найбільш вузька смуга пропускання, що максимально співпадає зі смугою випромінювання тіла людини, щоб відфільтрувати оптично випромінювання від інших матеріалів. Тому найкращим матеріалом для створення оптичної системи датчиків ІЧ термометрів є германій (Ge).

Вплив на точність буде здійснювати також площа лінзи. На прикладі астрономічної техніки та зокрема телескопів - не важливо, чи встановлені вони на

орбіті або на земній поверхні. Чим більша площа дзеркала, тим слабший сигнал можна отримати з глибин космосу. З пірометрами картина та сама. Від площі лінзи залежить потужність прийнятого теплового потоку. Це не визначальний показник, але також робить вплив на точність.

Тому потрібно знайти баланс між діаметром, якістю виконання оптики, матеріалом, і точністю установки лінз.

Використання методу багатократного вимірювання напруги отриманої АЦП з матеріалу, що поглинає ІЧ випромінювання та відповідно АЦП з більшою швидкістю перетворення дозволить зменшити випадкові похибки вимірювань (шляхом статистичної оцінки результату та викидання грубих похибок). А використання АЦП з більшою розрядністю надасть можливість більш точно проводити сам процес перетворення кожного окремого вимірювання.

Крім параметрів самого вимірювального приладу на точність вимірювання впливають зовнішні фактори, основні з них:

- частина тіла людини, що підлягає вимірюванню;
- хроматична аберация;
- оптичні завади (пил, дим та інші дрібнодисперсні речовини) на шляху між тілом та ІЧ датчиком [18, 19].

По-перше, на точність буде впливати те, температуру якої частини тіла вимірюють, оскільки нормальна температура різних частин тіла відрізняється з причини різного рівня кровообігу (табл. 3). З таблиці видно, що вимірювання температури на лобі краще взагалі не вимірювати, а розкид температур для різних частин тіла буди різним, тому треба це врахувати при оцінюванні виходу виміряної температури за межі границь температур здоровою людиною.

**Таблиця 3.** Межові значення температур для різних частин тіла

Спосіб вимірювання температури	Мінімальна Т, °С	Максимальна Т, °С
Ректально	36.2	37.7
Вагинально	36.0	37.5
Орально (щокоривий)	35.5	37.1
Орально (під язиком)	35.7	37.3
Аксилярно (під мишкою)	35.2	36.7
Вухо	35.8	37.1
Лоб	-*	-*

\* Залежить від температури навколишнього середовища

Розглянемо вплив хроматичної аберації. Дистанційний метод вимірювання температури на відміну від контактного способу, заснований на перетворенні потужності інфрачервоного випромінювання (теплого потоку). Якщо матеріал оптики по-різному пропускає промені в залежності від довжини хвилі, то відбувається "розмиття".

Пил, дим, частинки солей, пилок рослин, бактерій, мікроби, краплі води, кристали льоду і інші частинки відіграють велику роль при розсіюванні випромінювання, а також є центрами конденсації водяної пари при утворенні туманів і хмар (рис. 4).



Рисунок 4. Вимірювання через перешкоди

**Система для отримання статистичної інформації для виявлення факторів впливу та аналіз результатів**

Для отримання статистичної інформації про вплив перерахованих факторів на точність вимірювання було проведено розробку апаратної частини інфрачервоного безконтактного термометра з напи-

санням програмного забезпечення реєстрації проведених вимірювань при різних умовах та співставлення отриманих даних з контактним методом вимірювання з використанням ртутного градусника (оскільки цей метод є найбільш точним, див. табл. 1).

Було запропоновано схему системи, яку наведено на рис. 5.

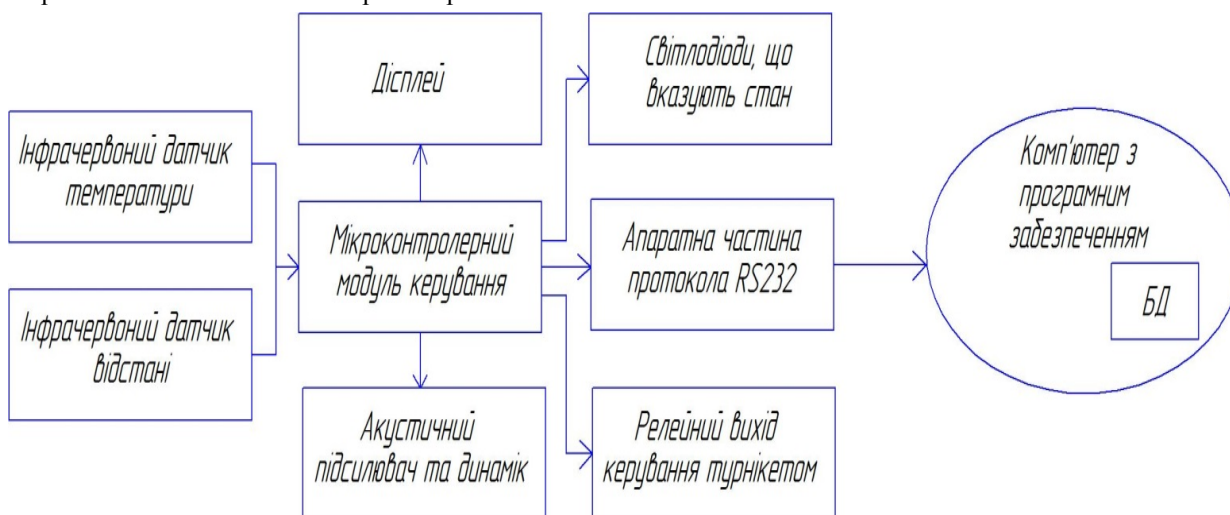


Рисунок 5. Структура розроблюваної системи

Основним елементом системи є інфрачервоний датчик температури, що проводить вимірювання та передає дані на мікроконтролерний модуль керування. Також на модуль керування надходить сигнал з

датчика відстані для оцінювання впливу відстані вимірювання на точність.

Програма мікроконтролера проводить перерахунок отриманої інформації в залежності від виставле-

них коефіцієнтів та передає отриману інформацію на комп'ютер.

Комп'ютерна програма зберігає отримані дані в базі даних та відображає у таблиці. В залежності від значення температури запис підсвічується різним кольором та у випадку перевищення дозвільної температури тіла додатково сповіщує користувача.

До мікроконтролерного модулю також приєднаний дисплей, котрий відображає виміряні параметри, що зручно для того, хто вимірює свою температуру тіла. Додатково реалізовані червоний та зелений світлодіоди, що показують, знаходиться температура в нормі чи перевищена.

Для інформування користувача про закінчення процесу вимірювання та для сповіщення про перевищення допустимої температури до мікроконтролерного модулю додатково приєднаний динамік через акустичний підсилювач.

У якості температурного датчика було обрано датчик MLX90614ESF-DCI, оскільки він має максимальну точність серед датчиків, представлених на ринку, та невеликий кут огляду, що дає можливість фокусуватися на об'єкті вимірювання навіть на відстані до 2 м (рис. 6).



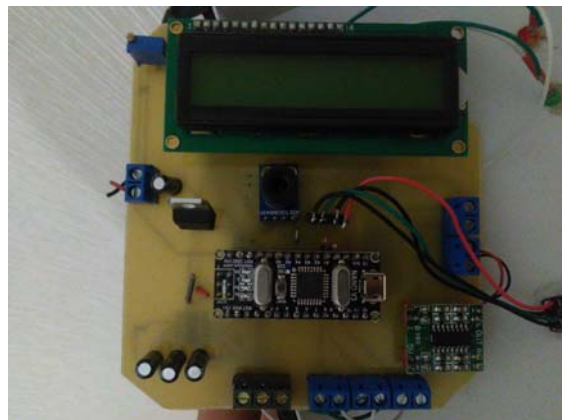
**Рисунок 6.** Інфрачервоний датчик температури MLX90614ESF-DCI

В якості датчика відстані було обрано лазерний датчик GY-530 на VL53L0X, оскільки він має невеликі розміри, достатню точність та передає дані по стандартній шині I<sup>2</sup>C.

Експериментальний зразок пристрою було розроблено, виготовлено та протестовано. Вигляд друкованого вузла модуля (плати та елементів) наведено на рис. 7.

Корпус у зборі представлено на рис. 8.

Програмне забезпечення, що реєструвало проведені вимірювання наведено на рис.9.



**Рисунок 7.** Конструкція плати розробленого модуля зі встановленими елементами



**Рисунок 8.** Апаратна частина системи в корпусі

Дослідження проводилось на одному з підприємств м. Дніпро з кількістю робітників більше 200 людей. Контроль проводився на протязі 3 місяців (з квітня по липень 2020 року). Загалом було проведено більше 10 тис. вимірювань.

Контроль правильності вимірювання проводився порівнянням з контактним вимірюванням ртутним градусником.

Аналіз отриманих статистичних даних показав вплив на точність вимірювання температури зовнішнього середовища. Оскільки було використано датчик з вмонтованою термопарою, а система знаходилась в приміщенні, була можливість одночасного вимірювання температури зовнішнього середовища, а температуру корпусу можна вважати рівною температурі датчика.

На рис. 10 наведено розподіл помилки вимірювань від різниці між температурою навколишнього та температурою тіла людини. Як видно з рисунку, при значній різниці між температурами спостерігається похибка зі знаком, що співпадає зі знаком різниці температур. Додаткові дослідження дозволять провести регресивний аналіз залежності та виявлення математичної залежності для включення її в системи безконтактної ІЧ термометрії.

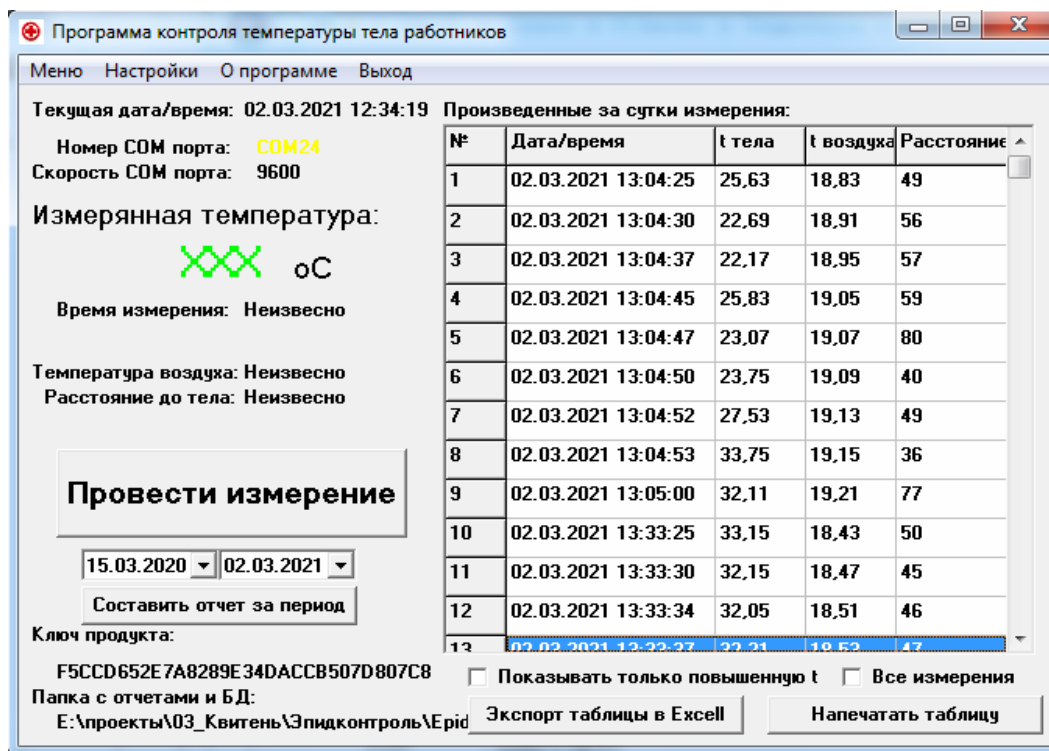


Рисунок 9. Основное окно программы системы безконтактного вимірювання температури

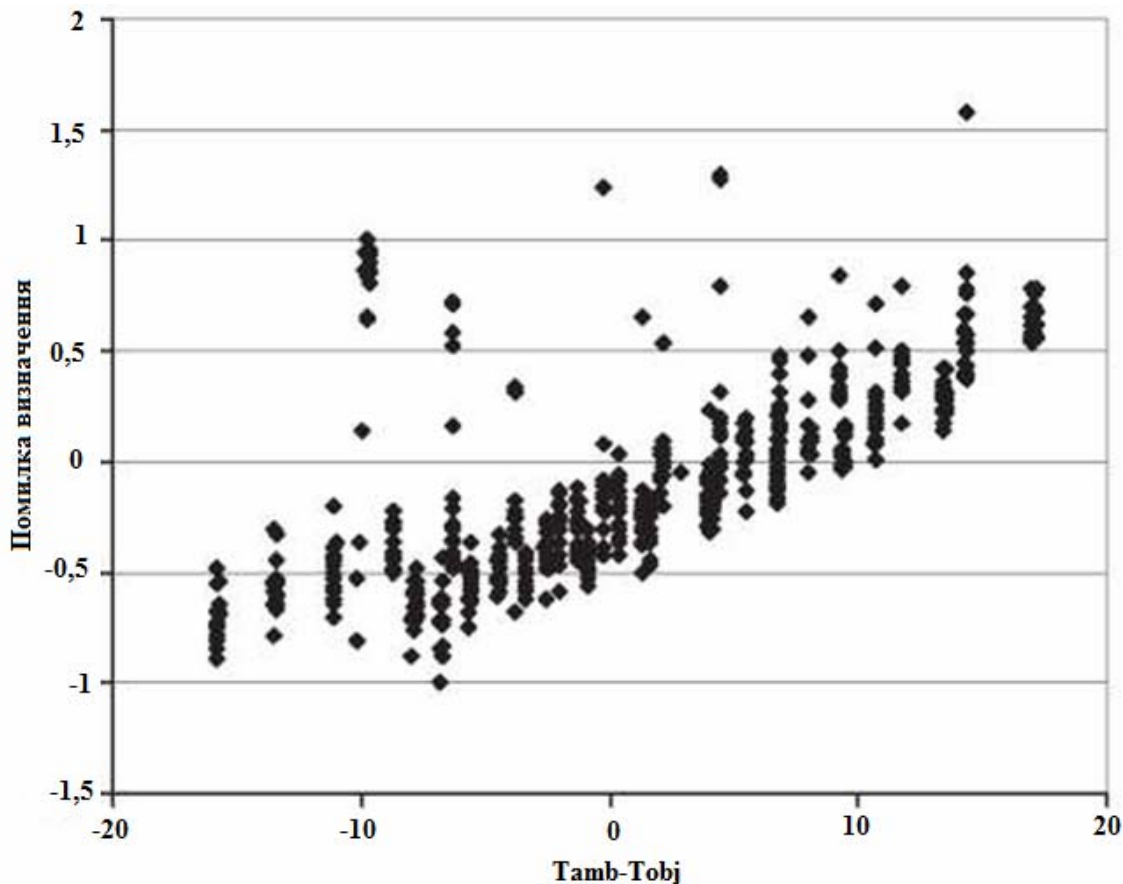


Рисунок 10. Вплив різниці температури

## V. ВИСНОВКИ

Проведений аналіз факторів, що впливають на точність вимірювань температури безконтактним методом дає можливість зробити наступні висновки.

Загалом точність вимірювання методом безконтактної ІЧ термометрії можна підвищити:

1) використанням поглинаючих матеріалів з піковим поглинанням у спектрі, що відповідає найбільшій інтенсивності випромінювання тіла людини (16 мкм);

2) використанням якісної оптичної системи з матеріалів, що мають максимальну пропускну спроможність у спектрі випромінювання тіла людини (використання добре оброблених лінз з германію для максимального співпадання смуги пропускання зі смугою випромінювання тіла людини);

3) при проведенні калібрування та подальших вимірюваннях додатково вимірювати температури навколишнього середовища та температуру корпусу пірометра з внесенням відповідних корекцій в показання приладу вимірювання температури тіла;

4) проведенням багатократних вимірювань з використанням швидкісного багатозрядного АЦП з гарною фільтрацією вхідного сигналу;

5) використанням якісного попереднього підсилювача сигналу від поглинаючого матеріалу до АЦП;

6) врахуванням частини тіла, що підлягає вимірюванню;

7) використанням оптичних систем з мінімальним кутом огляду для захисту від впливу випромінювання зовнішнього середовища;

8) знаходженням оптимального балансу між діаметром, якістю виконання оптики, матеріалом, і точністю установки лінз;

9) Врахуванням впливу запиленості, задимленості, вологості повітря між тілом людини та вимірювальним приладом

Матеріали, що наведені в даній статті, дозволяють з високою ймовірністю стверджувати, що після впровадження запропонованих методів збільшення точності вимірювання температури тіла безконтактним ІЧ методом можна буде гарантувати знаходження температури тіла людини в межах здорового стану (тобто не гірше, ніж при вимірюваннях контактними методами).

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Повный, А. Как устроены и работают бесконтактные термометры / А. Повный [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://elektrik.info/device/1096-kak-ustroeny-i-rabotayut-beskontaktnye-termometry.html>. (дата звернення: 18.12.2020).
- [2] Дуть или не дуть, и другие опыты с инфракрасным термометром [Электронный ресурс] – Режим

доступу:  
<https://habr.com/ru/company/dadget/blog/380695/>  
(дата звернення: 18.12.2020).

- [3] Бесконтактные исследования температуры тела во время пандемии [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://evercare.ru/news/beskontaktnye-issledovaniya-temperatury-tela-vo-vremya-pandemii>. (дата звернення: 18.12.2020).
- [4] Рассел Мостафа Махмуд. Исследования и разработка метода и оптико-электронного устройства. Дис. ... канд. техн. наук, Специальность 05.11.07 - Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы. – Москва, 2012.
- [5] Способ дистанционного измерения температурного поля. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://findpatent.ru/patent/242/2424496.html> (дата звернення: 18.12.2020).
- [6] Марукович, Е. И. Бесконтактная термометрия / Е. И. Марукович, А. П. Марков, С. С. Сергеев; под общ. ред. Е. И. Маруковича [Текст]. - Минск: Беларуская навука, 2014. - 252 с.
- [7] Ценин, В. Точность дистанционного определения температуры тела человека по результатам измерения температуры лба и запястья. [Электронный ресурс] – Режим доступа: // URL: <https://ru-bezh.ru/blog/36861-tochnost-distancionnogo-opredeleniya-temperaturyi-tela-chelovek>. (дата звернення: 18.12.2020).
- [8] Аппаратно-программный комплекс для дистанционного измерения и контроля температуры человеческого тела [Электронный ресурс] – Режим доступа: [https://www.evs.ru/kat\\_podr.php?kat=ippact&nkat\\_id=9](https://www.evs.ru/kat_podr.php?kat=ippact&nkat_id=9) (дата звернення: 18.12.2020).
- [9] Сагайдачный, А.А. Методы тепловизионного анализа пространственно-временной динамики температуры тела человека и их использование в диагностике. / А.А. Сагайдачный [Электронный ресурс] – Режим доступа: // URL: <http://earthpapers.net/preview/333489/a/?#?page=1> (дата звернення: 18.12.2020).
- [10] Радиотермометрия [Электронный ресурс] – Режим доступа: // URL: <https://www.fdoctor.ru/diagnostika/radiotermometriya>. (дата звернення: 18.12.2020).
- [11] Измерения глубинной температуры тела человека методом пассивной акустической термометрии [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/izmereniya-glubinnoy-temperatury-tela-cheloveka-metodom-passivnoy-akusticheskoy-termometrii/viewer> (дата звернення: 18.12.2020).
- [12] Шаракшанэ, А.С. Восстановление параметров меняющегося во времени пространственного температурного распределения модельных биологических объектов методом акустотермографии./

- А.С. Шаракшанэ [Электронный ресурс] – Режим доступа:  
<http://www.cplire.ru/rus/dissertations/Sharakhshane/dissertation.pdf> (дата звернення: 18.12.2020).
- [13] Glockmann, W. Noncontact Temperature Measurement Theory and Application // Walter Glockmann [Электронный ресурс] – Режим доступа:  
<https://www.omega.co.uk/temperature/z/noncontactm.html>. (дата звернення: 18.12.2020).
- [14] Types of Radiation Thermometers [Электронный ресурс] – Режим доступа:  
<https://www.omega.co.uk/literature/transactions/volume1/thermometers2.html>. (дата звернення: 18.12.2020).
- [15] Chrzanowski. K. Non-contact thermometry. Measurement Errors / K. Chrzanowski. // SPIE Polish Chapter, Warsaw, 2001. – 140 p.
- [16] Ring, F. Pioneering progress in infrared imaging in medicine / F. Ring // Quantitative Infrared Thermography Journal, vol. 11, no. 1, 2014. - P. 57-65.
- [17] Коленко, Е.А. Технология лабораторного эксперимента: Справочник / Е.А. Коленко - СПб.: Политехника, 1994, 205 с.
- [18] Dell'Isola, G.B. Noncontact Body Temperature Measurement: Uncertainty Evaluation and Screening Decision Rule to Prevent the Spread of COVID-19 / G.B. Dell'Isola, E. Cosentini, L. Canale, G. Ficco, M. Dell'Isola, // Sensors vol. 21, 2021 – P. 346. [Электронный ресурс] – Режим доступа:  
<https://www.mdpi.com/1424-8220/21/2/346/pdf>. (дата звернення: 10.01.2021).
- [19] Basic principles of Non-Contact Temperature Measurement [Электронный ресурс] – Режим доступа:  
<http://infrarougekelvin.com/wp-content/uploads/2016/06/4A-IR-Basics-2.pdf> (дата звернення: 18.12.2020).

Стаття надійшла до редакції 17.02.2021

## ПОДХОДЫ К ПОВЫШЕНИЮ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ТЕЛА ЧЕЛОВЕКА БЕСКОНТАКТНЫМИ ИК ТЕРМОМЕТРАМИ

- ФУРМАНОВА Н.И. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры информационных технологий электронных средств Национального университета «Запорожская политехника» Запорожье, Украина, e-mail: nfulmanova@gmail.com;
- ФАРАФОНОВ А.Ю. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры информационных технологий электронных средств Национального университета «Запорожская политехника» Запорожье, Украина, e-mail: farafon@zntu.edu.ua;
- МАЛЫЙ А.Ю. канд. техн. наук, доцент кафедры информационных технологий электронных средств Национального университета «Запорожская политехника» Запорожье, Украина, e-mail: docsasha2@gmail.com;
- ПИРОЖЕНКО А.А. аспирант кафедры информационных технологий электронных средств Национального университета «Запорожская политехника» Запорожье, Украина

**Цель работы:** проанализировать существующие подходы измерения температуры тела человека, предложить подходы для повышения точности измерения.

**Методы исследования:** аналитический, экспериментальный.

**Полученные результаты.** В статье рассмотрены подходы к повышению точности измерения температуры тела бесконтактными инфракрасными термометрами. Проанализированы параметры инфракрасных измерителей температуры. Предложен состав системы для сбора статистической информации влияния факторов окружающей среды на точность измерений. Предложено программное обеспечение для проведения исследований. Приведены статистические данные измерений. Указаны пути повышения точности измерений бесконтактными инфракрасными термометрами. Предложено математическое и физическое обеспечение бесконтактного измерения температуры, проведен анализ параметров инфракрасных измерителей температуры тела, разработана система для получения статистической информации для выявления факторов влияния, проведен анализ результатов.

**Научная новизна.** Предложена уточненная формула для определения температуры тела, содержит следующие параметры: специфическая постоянная для отдельного устройства, зависящая от оптической системы фокусирования и поглощающего материала; степень излучения объекта, зависящая от материала объекта, температура которого измеряется; абсолютная температура анализируемого объекта; абсолютная

температура внешней среды; отраженное излучение внешней среды; абсолютная температура корпуса датчика пирометра.

**Практическая ценность.** В работе предложены рекомендации, способные в значительной степени повысить точность измерений при проектировании систем, содержащих инфракрасные термометры.

**Ключевые слова:** термометрия; инфракрасный; точность; статистические измерения; погрешность.

## APPROACHES TO IMPROVE THE ACCURACY OF MEASUREMENT OF HUMAN BODY TEMPERATURE BY CONTACTLESS IR THERMOMETERS

- FURMANOVA N.I. Ph.D, Associate professor, Associate professor at the department "Informational technologies of electronic devices", Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: nfurmanova@gmail.com;
- FARAFONOV O.YU. Ph.D, Associate professor, Associate professor at the department "Informational technologies of electronic devices", Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: farafon@zntu.edu.ua;
- MALIJ O.YU. Ph.D, Associate professor at the department "Informational technologies of electronic devices", Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: docsasha2@gmail.com;
- PIROZHENKO O.O. Postgraduate student at the department "Informational technologies of electronic devices", Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia, Ukraine

**Purpose:** analyze existing approaches to measuring human body temperature, propose approaches to improve measurement accuracy.

**Methodology.** analytical, experimental.

**Findings.** The article considers approaches to improving the accuracy of measuring body temperature with non-contact infrared thermometers. The parameters of infrared temperature meters are analyzed. The composition of the system for collecting statistical information on the influence of environmental factors on the accuracy of measurements is proposed. Research software is offered. Measurement statistics are given. Ways to increase the accuracy of measurements with non-contact infrared thermometers are indicated. Mathematical and physical support of non-contact temperature measurement is offered, the analysis of parameters of infrared body temperature meters is carried out, the system for receiving the statistical information for revealing of factors of influence is developed, the analysis of results is carried out.

**Originality.** An updated formula for determining body temperature is proposed, which contains the following parameters: specific constant for a particular device, which depends on the optical focusing system and the absorbing material; the degree of radiation of the object, which depends on the material of the object whose temperature is measured; the absolute temperature of the object being measured; absolute ambient temperature; reflected radiation from the environment; absolute temperature of the pyrometer sensor housing.

**Practical value.** The paper offers recommendations that can significantly increase the accuracy of measurements in the design of systems containing infrared thermometers.

**Keywords:** thermometry; infra-red; precision; statistical measurements; error

### REFERENCES

- [1] Povnyj, A. Kak ustroeny i rabotajut beskontaktnye termometry / A. Povnyj [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://elektrik.info/device/1096-kak-ustroeny-i-rabotajut-beskontaktnye-termometry.html>. (дата звернення: 18.12.2020).
- [2] Dut' ili ne dut', i drugie opyty s infrakrasnym termometrom [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://habr.com/ru/company/dadget/blog/380695/> (дата звернення: 18.12.2020).
- [3] Beskontaktnye issledovaniya temperatury tela vo vremja pandemii [Электронный ресурс] – Режим доступа: [https://evercare.ru/news/beskontaktnye-](https://evercare.ru/news/beskontaktnye-issledovaniya-temperatury-tela-vo-vremya-pandemii)
- [4] Rassel Mostafa Mahmud. (2012). Issledovaniya i razrabotka metoda i optiko-jelektronnogo ustrojstva distancionnogo izmerenija temperatury. Dis. ... kand. tehn. nauk Special'nost' 05.11.07 - Opticheskie i optiko-jelektronnye pribory i komplekсы. Moskva.
- [5] Sposob distancionnogo izmerenija temperaturnogo polja. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://findpatent.ru/patent/242/2424496.html> (дата звернення: 18.12.2020).
- [6] Marukovich, E. I., Markov, A. P., Sergeev, S. S.; (2014). Beskontaktnaja termometrija. [Tekst]. Minsk: Belaruskaja navuka, 252 s.



- [7] Cenin, V. Tochnost' distancionnogo opredelenija temperatury tela cheloveka po rezul'tatam izmerenija temperatury lba i zapjast'ja. URL: <https://ru-bezh.ru/blog/36861-tochnost-distancionnogo-opredeleniya-temperaturyi-tela-chelovek>. (дата звернення: 18.12.2020)
- [8] Apparavno-programmnyj kompleks dlja distancionnogo izmerenija i kontrolja temperatury chelovecheskogo tela [Електронний ресурс] – Режим доступу: [https://www.evs.ru/kat\\_podr.php?kat=ippact&nkat\\_id=9](https://www.evs.ru/kat_podr.php?kat=ippact&nkat_id=9) (дата звернення: 18.12.2020).
- [9] Sagajdachnyj, A.A. Metody teplovizionnogo analiza prostranstvenno-vremennoj dinamiki temperatury tela cheloveka i ih ispol'zovanie v diagnostike. / A.A. Sagajdachnyj [Електронний ресурс] – Режим доступу: // URL: <http://earthpapers.net/preview/333489/a?#?page=1> (дата звернення: 18.12.2020).
- [10] Radiotermometrija [Електронний ресурс] – Режим доступу: // URL: <https://www.fdoctor.ru/diagnostika/radiotermometriya>. (дата звернення: 18.12.2020).
- [11] Izmerenija glubinnoj temperatury tela cheloveka metodom passivnoj akusticheskoj termometrii [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://cyberleninka.ru/article/n/izmereniya-glubinnoy-temperatury-tela-cheloveka-metodom-passivnoy-akusticheskoy-termometrii/viewer> (дата звернення: 18.12.2020).
- [12] Sharakshanje, A.S. Vosstanovlenie parametrov menjajushhegosja vo vremeni prostranstvennogo temperaturnogo raspredelenija model'nyh biologicheskikh ob'ektov metodom akustotermografii. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.cplire.ru/rus/dissertations/Sharakshane/dissertation.pdf> (дата звернення: 18.12.2020).
- [13] Glockmann, W. Noncontact Temperature Measurement Theory and Application // Walter Glockmann [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.omega.co.uk/temperature/z/noncontactm.html>. (дата звернення: 18.12.2020).
- [14] Types of Radiation Thermometers [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.omega.co.uk/literature/transactions/volume1/thermometers2.html>. (дата звернення: 18.12.2020).
- [15] Chrzanowski, K. (2001). Non-contact thermometry. Measurement Errors. SPIE Polish Chapter, Warsaw, 140 p.
- [16] Ring, F. (2014). Pioneering progress in infrared imaging in medicine. // Quantitative Infrared Thermography Journal, vol. 11, no. 1, 57-65.
- [17] Kolenko, E.A. (1994). Tehnologija laboratornogo jeksperimenta: Spravochnik. SPb.: Politehnika, 205.
- [18] Dell'Isola, G.B. Noncontact Body Temperature Measurement: Uncertainty Evaluation and Screening Decision Rule to Prevent the Spread of COVID-19 / G.B. Dell'Isola, E. Cosentini, L. Canale, G. Ficco, M. Dell'Isola, // Sensors vol. 21, 2021 – P. 346. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/2/346/pdf>. (дата звернення: 10.01.2021).
- [19] Basic principles of Non-Contact Temperature Measurement [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://infrarougekelvin.com/wp-content/uploads/2016/06/4A-IR-Basics-2.pdf> (дата звернення: 18.12.2020).