

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ "ЗАПОРІЗЬКА ПОЛІТЕХНІКА"

---



*Науковий журнал*

# ЕЛЕКТРОТЕХНІКА та ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА

№3'2024

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

*Виходить 4 рази на рік*

Запоріжжя

2024

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.

ЗАКОРДОННІ ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ  
КОЛЕГІЇ

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

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

ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ (Україна)

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

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

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

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

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

Комп'ютерна верстка Дяченко О.О. Редактор англійських текстів Войтенко С.В. Журнал підписано до друку 16.10.2024 за рекомендацією вченої ради національного університету "Запорізька політехніка" (протокол №3 від 29.10.2024 р.). Формат 60x84/8. Ум. Др. Арк. 6,28. Тираж 300 прим. Зам. №1181.

ZAPORIZHZHIA POLYTECHNIC NATIONAL UNIVERSITY

---



*Scientific journal*

# **ELECTRICAL ENGINEERING & POWER ENGINEERING**

**№3'2024**

*Founded by Zaporizhzhia Polytechnic National University in May 1999*

*4 issues per year*

Zaporizhzhia

2024

*Editor-in-chief*Prof., Sc.D.  
Dmytro 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; **O.S. Nazarova**, Ph.D., assoc. prof., Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia, Ukraine; **Yu.S. Bezverkhnia**, Ph.D., Senior Lecturer, Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia, Ukraine.

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

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

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

Founder and editor:

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

Journal was registered:

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

Address of editor and editorial office:

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

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

Computer layout Dyachenko O.O. Editor of English texts Voitenko S.V. The journal was signed on October 16, 2024 on the recommendation of the academic council of the Zaporizhzhia Polytechnic National University (Protocol No.3 dated October 29, 2024). Sheet size 60x84/8. Cond. Print. Sheets 6,28. Number of copies printed 300. Rep. № 1181.

# ЗМІСТ

## I ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

***Синецький А.В., Коцур І.М.***

Визначення параметрів перетворювача для високовольтних електромеханічних систем  
стаціонарних установок промислових вентиляторів.....7

***Верещаго Є.М., Костюченко В.І.***

Імпульсний стабілізатор струму з цифровим керуванням для системи електроживлення  
плазмотрону.....16

***Олєйніков М.О.***

Система автоматичного керування електроприводом мостового крану з  
урахуванням пружних зв'язків.....25

## II ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА

***Папайка Ю.А., Лисенко О.Г., Малишко М.М., Удовик О.В.***

Визначення показників якості напруги у промислових системах електропостачання  
при обмеженій потужності енергосистеми.....36

***Бялобржеський О.В., Олійніченко М.Ю., Ворона В.В., Якимець С.М.***

Дослідження розподілу симетричних складових в електричній системі з дизель  
генераторною установкою при несиметричному навантаженні.....45

# CONTENTS

## I ELECTRICAL ENGINEERING

*Synetskyi A.V., Kotsur I.M.*

Determination of converter parameters for high-voltage electromechanical systems of stationary installations of industrial fans.....7

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

Pulse current stabilizer with digital control for the power supply system of the plasmatron.....16

*Olieinikov M.*

Automatic control system for the electric drive of an overhead crane considering elastic Connections.....25

## II POWER ENGINEERING

*Papaika Yu.A., Lysenko O.G., Malyshko M.M., Udovyk O.V.*

Determination of voltage quality indicators in industrial power supply systems with limited energy system capacity.....36

*Bialobrzheskyi O.V., Oliynichenko M.Y., Vorona V.V., Yakimets S.M.*

Research of the distribution symmetrical components in an electrical system with a diesel generator at an unsymmetrical load .....45

## ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ПЕРЕТВОРЮВАЧА ДЛЯ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ СТАЦІОНАРНИХ УСТАНОВОК ПРОМИСЛОВИХ ВЕНТИЛЯТОРІВ

**СИНЕЦЬКИЙ А.В.** аспірант кафедри електричних машин Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: xibi-tur@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-1859-4171>;

**КОЦУР І.М.** канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електричних машин Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: igor.m.kotsur@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6394-7849>.

**Мета роботи.** Провести дослідження електромагнітних процесів в колі фазного ротора високовольтного асинхронного двигуна, під'єданого через перетворювач підвищуючого типу до мережі, визначити параметри перетворювача та їх взаємозв'язок з коефіцієнтом посилення за напругою для забезпечення оптимального рівня енергоефективності електромеханічної системи.

**Методи дослідження.** Методи теоретичної електротехніки для побудови схеми заміщення роторного кола асинхронного двигуна з перетворювачем підвищуючого типу, методи рішення системи диференціальних рівнянь першого порядку, аналітичні методи.

**Отримані результати.** Доведена доцільність щодо застосування перетворювача, який виконує поєднання роторного кола високовольтного асинхронного двигуна з мережею електропостачання, та забезпечує регулювання ЕРС ротора з рекуперацією енергії ковзання ротора асинхронного двигуна до мережі електропостачання. Це забезпечить регулювання швидкістю потужних високовольтних асинхронних двигунів на стороні ротора з ЕРС до 600В, та значно зменшить собівартість високовольтної електромеханічної системи. Запропонована методика щодо визначення коефіцієнту посилення перетворювача та параметрів роторного кола електромеханічної системи, яка дозволяє визначити коефіцієнт трансформації узгоджувального трансформатора при оптимальному значенні коефіцієнту посилення за напругою. Визначені умови безаварійного режиму роботи інвертора в момент пуску електромеханічної системи. Досягнення цих умов забезпечується визначенням затримки керуючого сигналу на силові ключі інвертора перетворювача підвищуючого типу. Встановлено співвідношення коефіцієнту посилення за напругою з еквівалентним опором роторного кола електромеханічної системи.

**Наукова новизна.** Встановлено співвідношення коефіцієнту посилення за напругою з еквівалентним опором роторного кола електромеханічної системи, що дозволить забезпечити узгодження ЕРС ротора з напругою мережі електропостачання при збереженні високого рівня енергоефективності.

**Практична цінність.** Запропонована методика щодо визначення коефіцієнту посилення та параметрів перетворювача підвищуючого типу, яка дозволяє визначити коефіцієнт трансформації узгоджувального трансформатора при оптимальному значенні коефіцієнту посилення за напругою. Запропонована методика може бути застосована при моделюванні складних потужних високовольтних електромеханічних систем особливо для стаціонарних установок промислових вентиляторів.

**Ключові слова:** перетворювач; параметри роторного кола, електромеханічна система; енергоефективність, висока напруга.

### I. ВСТУП

Застосування автоматизованої регульованої електромеханічної системи розглядається як найбільш актуальний та ефективний засіб енергозбереження [1]. Основні втрати (до 90%) припадають на сферу енергоспоживання, і саме тут мають бути сконцентровані основні зусилля щодо раціонального використання електроенергії [2], [3]. Так електромеханічні системи у всіх розвинених країнах споживають до 70% всієї електроенергії, що виробляється. Найбільш істотна її економія може бути досягнута при використанні регульованих електромеханічних систем у поєднанні з

автоматизацією технологічних процесів [4]. Наприклад, одним з найбільш енергоємних електромеханічних систем є вентилятори головного провітрювання вугільних шахт. Середня встановлена потужність електромеханічних систем для вентиляторів становить (1000 - 1600) кВт, а найбільш потужних установок - до 4000 кВт. Як приводний двигун в таких системах використовуються асинхронні двигуни з фазним ротором (АДФР) [5]. Тому на сьогоднішній день особливої інтерес представляють електромеханічні системи з АДФР, які мають широке застосування також і в підійомно-транспортних механізмах, в конвеєрних системах. Використання плавного регулювання в су-

часних електромеханічних системах істотно знижує споживання електроенергії і механічних навантажень, знос елементів механізмів, що істотно підвищує надійність систем.

## II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Існує ряд технічних рішень, які дозволяють формувати характеристики з постійним моментом приводів на базі АДФР та забезпечувати плавність пуску з постійним прискоренням. До таких найбільш поширених систем відносяться класичні системи асинхронно - вентильного каскаду (АВК) [6], індуктивно-емісійні перетворювачі (ІЕП) [7], а також системи імпульсного регулювання струму ротора АДФР [8]-[10]. Недоліки таких систем відомі всім. До основних недоліків для ІЕП можна віднести відсутність можливості змінити величину струму, отже, і моменту приводного АДФР. Системи АВК мають низький коефіцієнт потужності, а також збільшену індуктивність узгоджувального реактора. Система імпульсного регулювання має низький коефіцієнт корисної дії, а також призводить до перенапруги обмотки ротора в процесі комутації ключа в колі випрямленого струму ротора АДФР.

У [8]-[9] запропонована система імпульсного частотно-струмового регулювання асинхронно-вентильного каскаду, яка поєднує в собі позитивні регульовальні характеристики імпульсного регулювання з можливістю рекуперації енергії в мережу. У порівнянні з ІЕП, перетворювач дозволяє незалежно підтримувати постійний струм в роторі від змінюваних параметрів АДФР в підсинхронному діапазоні обертання ротора [11]. Дана система регулювання добре зарекомендувала себе в електроприводах підйомно-транспортних механізмах і може бути також ефективно використана для потужних високовольтних електромеханічних систем вентиляторних установок, де застосування високовольтних перетворювачів частоти призводить до істотного збільшення їх вартості. Наявність джерела струму (моменту) в роторі перетворювача для керування вентиляторними навантаженнями дає можливість при заданому натиску повітря автоматично вибирати робочу точку витратно-напірної характеристики об'єкта провітрювання або гідропостачання при змінній величині витрати. Перетворювач дозволяє підвищити енергоефективність електромеханічних систем установок і механізмів різних галузей промисловості [11].

Відомо, що збільшення вихідної напруги в перетворювачі при зміні коефіцієнта заповнення обмежена втратами в самому перетворювачі. Крім цього, збільшення вихідної напруги можливе тільки при зниженні струму навантаження. При цьому, зростає коефіцієнт корисної дії перетворювача. У зв'язку з цим не вирішена задача в частині визначення оптимального значення коефіцієнта посилення перетворювача, що забезпечує високий коефіцієнт корисної дії, а також встановлення зв'язку його значення з встановленою

потужності елементів схеми перетворювача. Крім того визначення коефіцієнта посилення, а також параметрів схеми заміщення перетворювача дозволить розробити коло-польову модель електромеханічної системи з застосуванням високовольтного АД з фазним ротором для подальшого дослідження електромагнітних та механічних процесів в процесі регулювання аеродинамічними параметрами промислових вентиляторів.

## III. МЕТА РОБОТИ

Метою роботи є дослідження електромагнітних процесів в колі фазного ротора високовольтного асинхронного двигуна, під'єданого через перетворювач підвищуючого типу до мережі, визначити параметри перетворювача та їх взаємозв'язок з коефіцієнтом посилення за напругою для забезпечення оптимального рівня енергоефективності електромеханічної системи.

## IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ І АНАЛІЗ ОТРИМАННИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

На рис. 1 наведена електромеханічна система АД з фазним ротором та імпульсним перетворювачем підвищуючого типу з інвертором відомим мережею в колі ротора. Наявність конденсатора (С) забезпечує виключення перенапруги в обмотці ротора, викликаного частою комутацією ключа (К). Діод (VD) запобігає появі зворотного струму з конденсатора при замиканні ключа. При розмиканні ключа енергія в обмотці ротора, а також частина енергії ковзання, залежно від співвідношення Е.Р.С. ротора та Е.Р.С. інвертора (I), рекупрується в мережу при постійному куті інвертування малопотужного інвертора, що забезпечує мінімальне споживання реактивної енергії з мережі і дозволить підвищити коефіцієнт потужності електромеханічної системи у всьому діапазоні частоти обертання ротора.

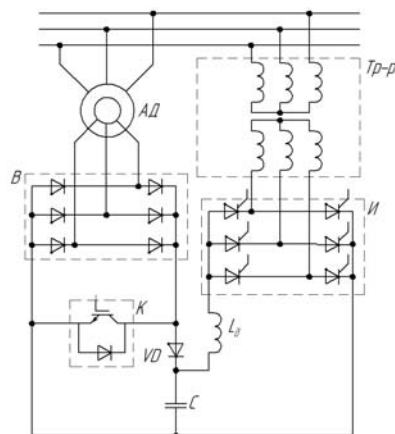


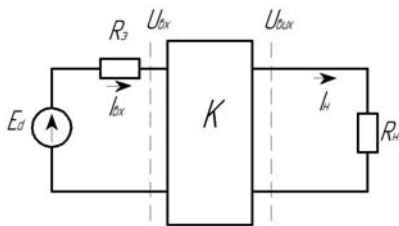
Рисунок 1. Електромеханічна система асинхронного двигуна з перетворювачем підвищуючого типу та інвертором відомим мережею в колі ротора

Узгодження Е.Р.С. ротора та Е.Р.С. інвертора



може виконуватись за допомогою трансформатора чи автотрансформатора. Коефіцієнт трансформації визначається вихідною напругою інвертора відомого мережу.

Спрощена схема роторного кола електромеханічної системи наведено на рис. 2. Тут навантаження представлена у вигляді активного опору  $R_n$ , яке для досліджуваного перетворювача характеризує кількість енергії, що рекуперується в мережу.



**Рисунок 2.** Спрощена схема роторного кола електромеханічної системи

Як відомо з [10], коефіцієнт передачі ідеального перетворювача підвищуючого типу описується співвідношенням [13]:

$$K = \frac{U_{vux}}{U_{ex}} = \frac{I}{I - \gamma}, \quad (1)$$

$$K = \frac{I_{ex}}{I_{vux}}, \quad (2)$$

де  $I_{vux}$ ,  $U_{vux}$  - відповідно середнє значення вихідного струму та напруги перетворювача;  $I_{ex}$ ,  $U_{ex}$  - відповідно середнє значення вхідного струму та напруги перетворювача;  $\gamma = t_i/T$  - коефіцієнт заповнення, рівний відношенню тривалості включеного стану силового ключа  $t_i$  до періоду повторюваності  $T$ .

З (1) бачимо, що при  $\gamma \rightarrow I$ , коефіцієнт передачі  $K \rightarrow \infty$ , відповідно, і вихідна напруга зростає до нескінченності, що призводить до порушення закону збереження енергії. На практиці, збільшення вихідної напруги при зміні коефіцієнта заповнення обмежені втратами як в джерелі живлення, так і в самому імпульсному перетворювачі.

В основу цієї моделі покладено уявлення про імпульсний перетворювач як про "чорний ящик" без втрат, властивості якого описуються наступною системою рівнянь [13]:

$$U_{vux} = K \cdot U_{ex}, \quad (3)$$

$$I_{ex} = K \cdot I_n, \quad (4)$$

де  $U_{ex}$ ,  $U_{vux}$  - середнє значення вхідного та вихідного напруження, відповідно;  $K$  - коефіцієнт перетво-

рення;  $I_{ex}$  - середнє значення вхідного струму;  $I_n$  - середнє значення струму навантаження.

Рівність коефіцієнтів передачі за струмом та за напругою в рівняннях (3) і (4) для ідеального перетворювача підвищуючої напруги можна довести, виходячи з умови рівності потужності на вході і на виході. Наявність втрат у системі враховується за допомогою еквівалентного опору втрат [13]:

$$R_e = R_2 + R_{nm}, \quad (5)$$

де  $R_2$  - внутрішній опір джерела живлення;  $R_{nm}$  - еквівалентний опір втрат перетворювача.

Таким чином, потужність втрат у системі, згідно такої моделі, пропорційна другому ступеню вхідного струму [13]:

$$P_n = I_{ex}^2 \cdot R_e, \quad (6)$$

Із еквівалентної схеми, наведеної на рис. 2 виходить, що:

$$U_{ex} = E_d - I_{ex} \cdot R_e. \quad (7)$$

Тоді, використовуючи (3), (4) та (7) рівняння можна переписати в наступному вигляді:

$$U_{vux} = K \cdot E_d - K^2 \cdot I_n \cdot R_e. \quad (8)$$

Рівняння (8) є рівнянням зовнішньої характеристики перетворювача при постійному  $K$  і, відповідно, рівнянням регульовальної характеристики при постійному струмі  $I_n$ . Досліджуючи (8) на максимум, можна показати, що існує "оптимальне" (за величиною вихідної напруги) значення коефіцієнта перетворення:

$$K_0 = \frac{E_d}{2R_e \cdot I_n}. \quad (9)$$

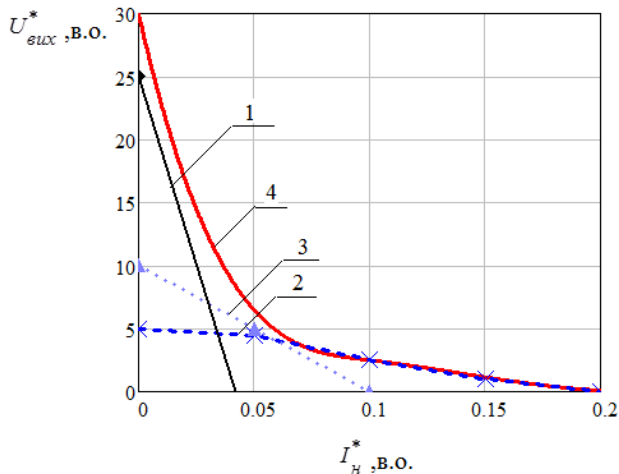
Якщо вибрати в якості базисних величин  $U_0 = E_d$  і  $I_0 = E_d/R_e$ , то рівняння (8) можна представити у відносних одиницях:

$$U_{vux}^* = K - K^2 \cdot I_n^*. \quad (10)$$

На рис. 3 показано сімейство зовнішніх характеристик, побудоване за (10). Як видно з рис. 3, всі зовнішні характеристики є дотичними до гіперболи граничної потужності системи  $P_{max}$ .

З [13], величина граничної потужності дорівнює:

$$P_{max} = \frac{1}{4} U_0 I_0 = \frac{E_d^2}{4R_e}. \quad (11)$$

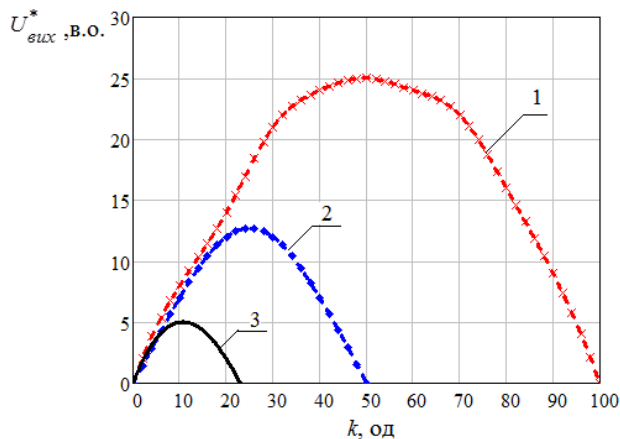


1) граничне значення потужності ( $P_n$ ); 2 – при  $k=5$ ; 3 – при  $k=10$ ; 4 – при  $k=25$ ;

**Рисунок 3.** Сімейство зовнішніх характеристик перетворювача: 1) граничне значення потужності ( $P_n$ ); 2 – при  $k=5$ ; 3 – при  $k=10$ ; 4 – при  $k=25$ ;

Слід зазначити, що при струмі навантаження, що відповідає точки дотику зовнішньої характеристики до гіперболи граничної потужності (див. рис. 3), коефіцієнт корисної дії (К.К.Д.) дорівнює 0,5. Відповідно, при менших струмах К.К.Д зростає, а при великих падає. Крім того, в перетворювачі підвищуючого типу коефіцієнт перетворення  $K$  не може бути менше одиниці.

На рис. 4 наведені регулювальні характеристики перетворювача. Як видно з представлених кривих, істотні підйоми вихідної напруги можливі лише при малих величинах відносних струмів навантаження.



1 – для  $I^*_n = 0,01$ ; 2 – для  $I^*_n = 0,02$ ; 3 – для  $I^*_n = 0,05$

**Рисунок 4.** Сімейство регулюючих характеристик перетворювача

Так як, при зміні Е.Р.С. ротора АД, енергія, яка віддається в мережу, залежить від ковзання ротора, а тому вираз (8) доцільно записати у вигляді:

$$U_n = K \cdot E_{d0} \cdot s - K^2 \cdot \frac{P_n \cdot s}{U_{вих}} \cdot R_e, \quad (12)$$

$$I_n = \frac{P_n \cdot s}{U_{вих}}, \quad (13)$$

де  $P_n$  - номінальна потужність на валу ротора;  $s$  - ковзання.

Для зручності розрахунків введемо базові величини:

$$U_{\delta} = E_{d0}, \quad (14)$$

$$I_{\delta} = \frac{P_n}{U_{\delta}} = \frac{P_n}{E_{d0}}, \quad (15)$$

$$R_n = \frac{E_{d0}^2}{P_n}. \quad (16)$$

Тоді рівняння (12) у відносних одиницях має вигляд:

$$U_n^* = K \cdot s - K^2 \cdot R_e^*, \quad (17)$$

де

$$R_e^* = \frac{R_e}{R_n}. \quad (18)$$

Максимальний коефіцієнт підсилення перетворювача дорівнює:

$$K_{max} = \frac{1}{2 \cdot R_e^*}. \quad (19)$$

Таким чином максимальний коефіцієнт підсилення не залежить від ковзання. При заданій напрузі холостого ходу джерела, еквівалентний опір втрат  $R_e$  накладає принципове обмеження на досяжний рівень вихідної напруги інвертора підвищуючого типу. Величина максимальної вихідної напруги швидко зменшується зі збільшенням необхідного струму навантаження. Прагнення "видавити" максимально можливу вихідну напругу призводить до зменшення К.К.Д, який на рівні максимальної потужності дорівнює лише 50%, а реальний коефіцієнт перетворення становить лише половину коефіцієнта перетворення "ідеального перетворювача", що визначається за (1).

Таким чином, при ідентифікації оптимальних параметрів, а також частоти комутації і коефіцієнта заповнення імпульсів силового ключа К (рис. 1), необхідно визначити оптимальне значення еквівалентного опору  $R_e$ .

На рис. 5 представлена схема заміщення кола випрямленого струму ротора. Для даної схеми заміщення визначимо параметри перетворювача:

$$R_2 = r_{\text{dp}} + 2 \cdot r_T + \frac{3 \cdot x_T \cdot s}{\pi}, \quad (20)$$

$$R_1 = 2 \cdot (r_s + r_m) \cdot s + 2 \cdot r_r + \frac{3 \cdot x_{\text{d}} \cdot s}{\pi}, \quad (21)$$

$$L_1 = 2 \cdot L_{\text{d}}, \quad (22)$$

$$L_2 = L_{\text{dp}} + 2 \cdot L_T, \quad (23)$$

де  $r_{\text{dp}}$  - активний опір дроселя інвертора;  $L_{\text{d}}$  - індуктивність розсіювання фази АД;  $L_{\text{dp}}$  - індуктивність дроселя інвертора;  $r_r$  - активний опір фази ротора двигуна;  $r_s$  - активний опір фази статора, приведений до обмотування ротора;  $r_m$  - опір магнітного контуру АД;  $r_T$  - активний еквівалентний опір фази трансформатора;  $\frac{3 \cdot x_{\text{d}} \cdot s}{\pi}$  - еквівалентний опір, викликане комутацією вентилів випрямляча;  $\frac{3 \cdot x_{2T} \cdot s}{\pi}$  - еквівалентний опір, викликане комутацією вентилів інвертора;  $x_T$  - еквівалентний індуктивний опір фази трансформатора.

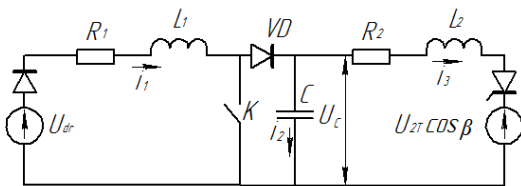


Рисунок 5. Схема заміщення кола випрямленого струму ротора АД

Індуктивний опір розсіювання фази АД:

$$x_{\text{d}} = x_s + x_r = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot (L_s + L_r), \quad (24)$$

де  $L_s$  - повна індуктивність фази статора, приведена до ротора АД;  $L_r$  - повна індуктивність фази ротора.

Відповідно до особливості комутації силового ключа (К) необхідно виділити основні етапи роботи схеми, кожному з яких буде відповідати певне рівняння перехідних процесів.

На рис. 6 представлені основні етапи роботи перетворювача. Перший (початковий) етап роботи перетворювача характеризується зарядом конденсатора (С) до значення напруги  $U_c = U_{2T} \cdot \cos \beta$  при розімкненому ключі (К) в період часу рівний  $t = t_1 - t_0$  (див. рис. 1). Цьому моменту часу буде відповідати контур заряду конденсатора  $C \rightarrow R_2 \rightarrow L_2 \rightarrow C$ . Щоб уникнути перекидання інвертора відомого мережею,

на його ключі будуть подаватися керуючі сигнали в момент його запуску. У цей час процес рекуперації енергії ковзання ротора неможливий (виконується умова  $U_c < U_{2T} \cdot \cos \beta$ ).

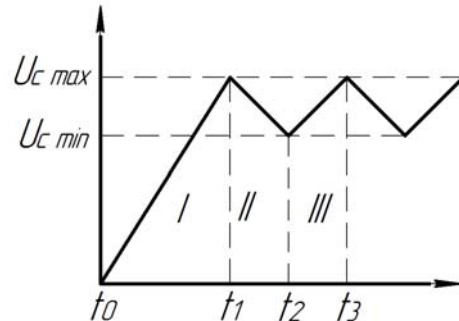


Рисунок 6. Етапи роботи перетворювача

Відповідно до рис.3 струм заряду конденсатора та напруга на першому етапі роботи схеми змінюватиметься за періодичним законом:

$$u_c(t) = U_{2T(0)} \cos \beta \cdot e^{-\delta \cdot t} \sin(\omega_0 t), \quad (25)$$

$$i_2(t) = C \cdot \frac{d}{dt} u_c(t), \quad (26)$$

де

$$\delta = \frac{R_2}{2 \cdot L_2}, \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{1}{2 \cdot L_2 \cdot C} - \left(\frac{R_2}{2 \cdot L_2}\right)^2}.$$

Для того, щоб перетворювач увійшов до другого етапу роботи необхідно визначити час затримки включення інвертора, після закінчення якого буде виконуватися умова рекуперації  $U_c \geq U_{2T} \cdot \cos \beta$ .

Мінімальне значення часу затримки включення інвертора визначається часом заряду конденсатора. Так як в процесі заряду конденсатора струм заряду зменшується, то для знаходження часу заряду конденсатора рівняння (25),(26) необхідно прирівняти до нуля. Отже, мінімальне значення часу затримки включення інвертора визначається згідно з наступним виразом:

$$t_1 = \frac{2 \cdot \arctg \left( \frac{\delta + \sqrt{\omega_0^2 + \delta^2}}{\omega_0} \right)}{\omega_0} - \frac{2 \cdot \arctg \left( \frac{\delta - \sqrt{\omega_0^2 + \delta^2}}{\omega_0} \right)}{\omega_0}, \quad (27)$$

На другому етапі перетворювач входить до основного режиму роботи. Другий етап роботи перетворювача характеризується розрядом конденсатора (С) при замкнутому ключі (К) у період часу  $t = t_2 - t_1$ . Енергія, що була накопичена на конденсаторі, рекуперується через інвертор до мережі. Цьому моменту часу відповідатимуть контури  $R_1 \rightarrow L_1 \rightarrow K \rightarrow R_1$  та  $C \rightarrow R_2 \rightarrow L_2 \rightarrow C$  (див. рис.5).

Система диференціальних рівнянь для даного стану схеми має вигляд:

$$R_1 \cdot i_1 + L_1 \cdot \frac{di_1}{dt} = 1,35 \cdot U_{dr} \cdot s, \quad (28)$$

$$U_{c(t=t_1)} - U_{2T} \cdot \cos(\beta) = R_2 \cdot i_3 + L_2 \cdot \frac{di_3}{dt}. \quad (29)$$

Розглянемо третій етап роботи перетворювача в момент часу рівний  $t = t_3 - t_2$ , при якому силовий ключ (К) розімкнено. У даному випадку частина енергії ковзання, а саме накопичена енергія в обмотці ротора, яка обумовлена різкою зміною випрямленого струму ротора, акумулюється на конденсаторі (контур  $R_1 \rightarrow L_1 \rightarrow C \rightarrow R_1$ ), а решта її частина рекуперується до мережі електропостачання через дросель та інвертор (контур  $R_1 \rightarrow L_1 \rightarrow VD \rightarrow R_2 \rightarrow L_2 \rightarrow R_1$ ).

Диференціальні рівняння для цього стану схеми мають вигляд:

$$R_1 \cdot i_1 + L_1 \cdot \frac{di_1}{dt} + \frac{1}{C} \int i_2 dt = 1,35 \cdot U_{dr} \cdot s, \quad (30)$$

$$R_1 \cdot i_1 + L_1 \cdot \frac{di_1}{dt} + L_2 \cdot \frac{di_3}{dt} + R_2 \cdot i_3 = 1,35 \cdot U_{dr} \cdot s + U_{2T} \cdot \cos \beta, \quad (31)$$

$$i_1 = i_2 + i_3, \quad (32)$$

Диференціальні рівняння (28)-(32), можуть бути зведені до системи лінійних рівнянь алгебри. Внаслідок цього можна визначити основні параметри перетворювача.

Активний опір дроселя інвертора можна визначити з наступного виразу:

$$r_{dp} = \frac{\gamma \cdot (U_{2T} \cos \beta - E_d) - I_{d\_cp} \cdot R_1}{I_d} - 2 \cdot r_l - \frac{3 \cdot x_T \cdot s}{\pi} \quad (33)$$

де

$$I_{d\_cp} = \frac{\gamma \cdot (U_{2T} \cos \beta - E_d)}{R_1 + R_2}, \quad (34)$$

$$E_d = 1,35 \cdot U_{dr} \cdot s. \quad (35)$$

де  $I_{d\_cp}$  - середнє значення випрямленого струму ротора АД;  $\gamma$  - коефіцієнт заповнення імпульсу при широтно-імпульсному регулюванні.

Індуктивність дроселя інвертора можна визначити з наступного виразу:

$$L_{dp} = \frac{T \cdot \gamma \cdot U_{2T} \cos \beta \cdot (1 - \gamma) - \Delta I_d \cdot L_1}{\Delta I_d} - 2 \cdot L_T, \quad (36)$$

$$\Delta I_d = \frac{\gamma \cdot U_{2T} \cos \beta \cdot (1 - \gamma)}{f_k \cdot (L_1 + L_2)}, \quad (37)$$

де  $\Delta I_d$  - величина розмаху пульсації випрямленого струму ротора;  $f_k$  - частота комутації силового ключа;

Величина ємності конденсатора повинна бути обрана таким чином, щоб забезпечити скидання енергії, яка накопичена в обмотці ротора на конденсатор:

$$\frac{L_1 \cdot (I_{d\max} - I_{d\min})^2}{2} \cdot f_k \leq \frac{(U_{c\max} - U_{c\min})^2}{2} \cdot C \quad (38)$$

де

$$I_{d\min} = I_{dcp} - \frac{\Delta I_d}{2}, \quad (39)$$

$$I_{d\max} = I_{dcp} + \frac{\Delta I_d}{2}. \quad (40)$$

$$U_{c\min} = U_{2T(0)} \cos \beta - \frac{U_{2T} \cos \beta \cdot \Delta U_c^*}{2}, \quad (41)$$

$$U_{c\max} = U_{2T(0)} \cos \beta + \frac{U_{2T} \cos \beta \cdot \Delta U_c^*}{2}. \quad (42)$$

Величина пульсації напруги на конденсаторі у в.о. може бути визначена з наступного виразу:

$$\Delta U_c^* = 1 - \frac{u_{2T} \cos \beta}{u_c} \quad (43)$$

Величину ємності конденсатора, згідно (38) можна визначити з наступного виразу:

$$C \geq \frac{L_1 \cdot (I_{d\max} - I_{d\min})^2 \cdot f_k}{(U_{c\max} - U_{c\min})^2} \quad (44)$$

Таким чином еквівалентний опір роторного кола АД можна визначити з наступного виразу:

$$R_e = 2(R_s + R_m)s + 2 \cdot R_r + 2\pi f(L_1 + L_2) +$$

$$+ R_{op} + R_T + \frac{3 \cdot x_\delta \cdot s}{\pi} + \frac{3 \cdot x_T \cdot s}{\pi} \quad (45)$$

Всі змінні, які містяться у виразах (27), (33) - (45) є або входними параметрами перетворювача, або паспортними даними елементів електромеханічної системи. Отримані вирази дозволяють визначити оптимальні параметри роторного кола електромеханічної системи, визначити необхідний коефіцієнт трансформації узгоджувального трансформатора, а також оптимальне значення коефіцієнта посилення перетворювача при забезпеченні найвищого рівня енергоефективності.

## V. ВИСНОВКИ

Запропонована методика щодо визначення коефіцієнту посилення перетворювача та параметрів роторного кола електромеханічної системи, яка дозволяє визначити коефіцієнт трансформації узгоджувального трансформатора при оптимальному значенні коефіцієнту посилення за напругою. Запропонована методика може бути застосована при моделюванні складних потужних високовольтних електромеханічних систем особливо для стаціонарних установок промислових вентиляторів.

Визначені умови безаварійного режиму роботи інвертора в момент пуску електромеханічної системи. Досягнення цих умов забезпечується визначенням затримки керуючого сигналу на силові ключі інвертора перетворювача підвищуючого типу.

Встановлено співвідношення коефіцієнту посилення за напругою з еквівалентним опором роторного кола електромеханічної системи, що дозволить забезпечити узгодження ЕРС ротора з напругою мережі електропостачання при збереженні високого рівня енергоефективності електромеханічної системи.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Kotsur, M. Speed Synchronization Methods of the Energy-Efficient Electric Drive System for Induction Motors / M. Kotsur, D. Yarymbash, I. Kotsur, Yu. Bezverkhnia // IEEE: 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), February 20-24, Lviv-Slavske, Ukraine, 2018, pp. 304-307 DOI: 10.1109/TCSET.2018.8336208.
- [2] Пивняк Г. Г. Сучасні частотно-регульовані асинхронні електроприводи з широтно-імпульсною модуляцією / Г.Г. Пивняк, О. В. Волков – Дніпропетровськ: Національний гірничий університет – 2006. – 470 с.
- [3] Лозинський, А. О. Розв'язання задач електромеханіки в середовищах пакетів MathCAD і MATLAB [Текст]: Навчальний посібник / А. О.

Лозинський, В. І. Мороз, Я. С. Паранчук. – Л.: Магнолія, 2007. – 215 с.

- [4] Dubey, G.K. Power semiconductor controlled drives / G.K. Dubey; - London: PHI. Edition, 2008. – 440 p.
- [5] Антощенко Н. І. Новий підхід до регулювання вентиляції вугільних шахт / Н. І. Антощенко, В. В. Калюжний, В. П. Котіков, Г. Б. Тинда, П. Д. Андрієнко, О. В. Садовий // Вугіль України – 2014 - №3 - С. 29-32.
- [6] Онищенко Г.Б. Электрический привод [Текст] Г. Б. Онищенко. – М.: Издательский дом "Академия", 2006. – 288с.
- [7] Волков И. В. Системы стабилизированного тока для автоматизированных электроприводов [Текст] / И. В. Волков, В. П. Стяжкин, С. В. Подольный // Пр. ін-ту електродинаміки НАН України. – 2009. – Вип. 23. – С. 64-72.
- [8] Пат. України 64126, МПК H02P 27/05(2006.01) Пристрій імпульсного керування процесами перетворення енергії в асинхронному двигуні з фазним ротором [Електронний ресурс] / П.Д. Андрієнко, М.І. Коцур, І.М. Коцур; заявл. 22.04.11; опубл. 25.10.2011, Бюл. №20, 2011р. – Режим доступу: [http:// http://www.uipv.org](http://www.uipv.org).
- [9] Коцур М. І. Особливості режиму роботи модифікованої системи імпульсного регулювання асинхронного двигуна з фазним ротором / М. І. Коцур, П. Д. Андрієнко, І. М. Коцур, // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – Кременчук: КрНУ, 2012. – №3(19) – С. 163 – 165.
- [10] Коцур, М. І. Регульований асинхронний електропривод з покращеними характеристиками / М. І. Коцур, А. А. Андрієнко, Д. С. Андрієнко, О. В. Немикіна // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – 2016. – №22(98) – С. 74 – 78.
- [11] Коцур М. І. Підвищення ефективності режиму гальмування противмиканням асинхронного двигуна з фазним ротором [Текст] / М. І. Коцур, І. М. Коцур, А. В. Близняков // Східно-Європейський журнал передових технологій. –2015. – №1/8(73). – С.27-30. DOI: <http://dx.doi.org/10.15587/1729-4061.2015.36670>
- [12] Шавьолкін О.В. Силові напіпровідникові перетворювачі енергії: Навчальний посібник. – Харків: ХНУМ ім. О.М. Бекетова, 2015. – 403с.
- [13] Переверзев, А.В. Характеристики підвищувальних перетворювачів для систем безперебійного електроживлення / О.В. Переверзев. – Київ: Технічна електродинаміка, 2004. – 239 с.

Стаття надійшла до редакції 10.09.2024 р.

## DETERMINATION OF CONVERTER PARAMETERS FOR HIGH-VOLTAGE ELECTROMECHANICAL SYSTEMS OF STATIONARY INSTALLATIONS OF INDUSTRIAL FANS

- SYNETSKYI A.V. postgraduate student of the Department of Electrical Machines, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: xibi-tur@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-1859-4171>;
- KOTSUR I.M. Ph.D in Engineering, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electrical Machines, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: igor.m.kotsur@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6394-7849>;

**Purpose.** To study the electromagnetic processes in the circuit of the phase rotor of a high-voltage induction motor connected to the network through a step-up converter, to determine the parameters of the converter and their relationship with the voltage gain to ensure the optimal level of energy efficiency of the electromechanical system.

**Methodology.** Methods of theoretical electrical engineering for the construction of a rotor circuit replacement scheme for an induction motor with a step-up converter, methods for solving a system of first-order differential equations, analytical methods.

**Findings.** The expediency of using a converter that combines the rotor circuit of a high-voltage induction motor with the power supply network and provides regulation of the rotor EMF with the recovery of the slip energy of the induction motor rotor to the power supply network has been proved. This will ensure speed control of powerful high-voltage induction motors on the rotor side with an EMF of up to 600 V and significantly reduce the cost of a high-voltage electromechanical system. A methodology for determining the converter gain and the parameters of the rotor circuit of the electromechanical system is proposed, which allows determining the transformation ratio of the matching transformer at the optimal value of the voltage gain. The conditions of trouble-free operation of the inverter at the moment of start-up of the electromechanical system are determined. Achieving these conditions is ensured by determining the delay of the control signal to the power keys of the inverter of a step-up converter. The correlation between the voltage gain and the equivalent resistance of the rotor circuit of the electromechanical system is established.

**Originality.** The ratio of the voltage gain to the equivalent resistance of the rotor circuit of the electromechanical system is established, which will ensure the matching of the rotor EMF with the voltage of the power supply network while maintaining a high level of energy efficiency.

**Practical value.** A methodology for determining the gain and parameters of a step-up converter is proposed, which allows determining the transformation ratio of a matching transformer at the optimal value of the voltage gain. The proposed methodology can be applied to the modelling of complex powerful high-voltage electromechanical systems, especially for stationary installations of industrial fans.

**Keywords:** converter; parameters of the rotor circuit, electromechanical system; energy efficiency, high voltage

### REFERENCES

- [1] Kotsur M., Yarymbash D., Kotsur I., 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.
- [2] Pivnyak, G.G. and Volkov A.V. (2006) *Sovremennye chastotno-reguliruemye asinkhronnye elektroprivody s shirotno-impul'snoi modulyaciyei* [Modern Frequency Controlled Asynchronous Electric Drives with Pulse-Width Modulation], Dnipropetrovsk: Natsionalnyi girnychiyi Universytet, Ukraine – 470 p.
- [3] Lozinskyi A. O., Moroz V. I., Paranchuk Ya. S. (2007). Solving problems of electromechanics in the environments of MathCAD and MATLAB packages. *Magnolia*, 215.
- [4] Dubey, G.K. (2008). Power semiconductor controlled drives. *PHI. Edition*, 440.
- [5] Antoshchenko N. I., Kalyuzhny V. V., Kotikov V. P., Tynda G. B., Andrienko P. D., Sadovoy A. V. (2014). New approach to regulation of ventilation of coal. *Coal of Ukraine*, 3, 29-32.
- [6] Onishchenko G.B. (2006) *Elektricheskiy privod* [Electric Drive], Moscow, Publishing House "Academia", 288 p.
- [7] Volkov I. V., Stiazhkin S.V., Podolnyi S. V. (2009). *Systemy stabilizirovannogo toka dlya avtomatizirovannykh elektroprivodov* [System of stabilized cur-

- rent for automated electric drives], *Trudih Institutu Elektrodinamiki NAN Ukrainih*, 23, 64-72.
- [8] Andrienko P.D., Kotsur M. I., Kotsur I.M. (2011) Patent of Ukraine 64126, Int. Cl.<sup>3</sup> H02P 27/05(2006.01) Prystryi impulsnogo keruvannya procesamy peretvorenniya energiyi v asinkhronnomu dvyguni z faznym rotorom. [Device for impulse control by energy conversion processes in wound-rotor induction motor] published 25.10.2011, Bulletin №20,
- [9] Kotsur M. I., Andrienko P. D., Kotsur I. M. (2012). Osobennosti rezhimov raboty modifitsirovannoy sistemy impulsnogo regulirovaniya [Operation modes features of modificate pulse control system of asynchronous motor with phase rotor], *Elektromechanichni ta enegrozberigayuchi sistemy*, 19, 3, 163-165.
- [10] M. I. Kotsur, A. A. Andrienko, D. S. Andrienko, O. V. Nemykina (2016). Regulated asynchronous electric drive with improved characteristics, *Electrical engineering and computer systems*, 22(98), 74 – 78.
- [11] Kotsur M.I., Kotsur I.M., Bliznyakov A.V. (2015). Increase effectiveness of reversible braking mode realization of the wound-rotor induction motor, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Volume 1, Issue 8, pp. 27-30. DOI: <http://dx.doi.org/10.15587/1729-4061.2015.36670>.
- [12] Shaviolkin O.V. (2015). Power semiconductor energy converters, KhNUM University named after OHM. Beketova, 403.
- [13] Pereverzev, A.V. (2004). Characteristics of step-up converters for uninterruptible power supply systems, *Tekhnichna Elektrodinamika*, 239.

## ІМПУЛЬСНИЙ СТАБІЛІЗАТОР СТРУМУ З ЦИФРОВИМ КЕРУВАННЯМ ДЛЯ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ ПЛАЗМОТРОНУ

**ВЕРЕЩАГО Є.М.** канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри морського приладобудування Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв, Україна, e-mail: venmkua@gmail.com, ORCID: 0000-0002-4370-7706;

**КОСТЮЧЕНКО В.І.** канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри суднових електроенергетичних систем Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв, Україна, e-mail: vitalii.kostiuchenko@nuos.edu.ua, ORCID: 0000-0003-2128-2388;

**Мета роботи.** Вирішення теоретичних і практичних завдань із забезпечення цифрового керування імпульсним перетворювачем за допомогою високошвидкісних мікропроцесорних засобів у режимі стабілізації вихідного струму із забезпеченням заданої тривалості перехідних процесів, викликаних збільшенням напруги навантаження та астатизму вихідного струму, що дозволяють отримати значні переваги порівняно з аналоговими варіантами.

**Методи дослідження.** Огляд літературних та патентних джерел з тематики, теорія імпульсних систем автоматичного керування, математичне моделювання процесів у імпульсних стабілізаторах струму у програмному середовищі MATLAB/Simulink та фізичне макетування.

**Отримані результати.** Наведено імітаційну модель автономної системи електроживлення на основі перетворювача, що використовує технологію м'якого перемикавання транзисторів та дугового навантаження. Синтезовано закон керування та розроблено модель імпульсного стабілізатора струму. Запропоновано метод і знайдено способи керування імпульсним стабілізатором струму, які забезпечують задану тривалість перехідних процесів та астатизм вихідного струму. Розроблено та виготовлено макет імпульсного стабілізатора з цифровим керуванням на основі однокристального обчислювального модуля. Результати дослідження підтверджують досягнення кінцевої тривалості перехідних процесів, викликаних ступінчастою зміною напруги навантаження, близькою до 3-4 періодів перетворення та астатизму вихідного струму. Показано, що застосування імпульсного стабілізатора, що повністю використовує цифровий контур керування, має незаперечні переваги перед аналоговими системами.

**Наукова новизна.** Вирішено завдання синтезу цифрового регулятора за заданим часом регулювання методом бажаних передатних функцій для перетворювача з м'яким перемиканням, що працює на дугове навантаження. Крім заданого часу регулювання забезпечені додаткові вимоги до якості в режимі, що встановився.

**Практична цінність.** Використання мікропроцесорної техніки дозволяє не лише реалізувати складні та нові високоефективні алгоритми керування перетворювачем, що працює в режимі імпульсного стабілізатора струму, а й додатково функції захисту від перевантажень, самодіагностики та телеметрії імпульсних перетворювачів. Застосування цього цифрового пристрою одночасно і для мети керування імпульсним перетворювачем дозволить відмовитися від аналогових ШІМ-контролерів і тим самим знизити власне енергоспоживання і масогабаритні характеристики, підвищити надійність функціонування імпульсних перетворювачів в системах електроживлення в цілому.

**Ключові слова:** імпульсний стабілізатор струму; цифровий контур керування; тривалість перехідного процесу; бажана передатна функція; імітаційна модель; синтез; астатизм; еталонна перехідна характеристика.

### I. ВСТУП

Якість регулювання (стабілізації) і точність системи природно оцінювати за допомогою прямих показників: часу регулювання  $t_{\text{рег}}$ , перерегулювання  $\sigma$ , помилки, що встановилася  $\Delta$  і т.д., пов'язаних з кривими перехідних процесів при відпрацюванні постійних впливів. В теорії автоматичного керування багато уваги приділяється проблемі синтезу систем за цими показниками якості. Для її вирішення розроблено різні частотні та кореневі методи [1]-[5]. Ці методи є

наближеними та трудомісткими, вимагають значної апріорної інформації.

Інший напрямок характеризується розробкою суворих методів, заснованих на оптимізації динамічних систем. До них відносяться метод динамічного програмування [1], [4], [5], принцип максимуму [1], [5], методи функцій Ляпунова [1], [5], нові методи варіаційного обчислення [2], [5]-[7]. На жаль, їх застосування для вирішення прикладних завдань зустрічає значні труднощі математичного та обчислю-



вального характеру.

Перспективним у теорії синтезу систем є напрям, пов'язаний з побудовою алгоритмів керування за умови здійснення бажаних траєкторій руху [8] – завданням синтезу за заданими прямими показниками якості методом бажаних передатних функцій. Роботи з розвитку цього напрямку мають велике теоретичне та практичне значення.

## II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

У статті розглядається завдання побудови алгоритмів цифрового керування системи стабілізації струму дуги на основі концепцій зворотних завдань динаміки. При цьому використовуються ідеї робіт [1], [5], [6] та одним із головних показників приймається час регулювання. У заключному розділі викладено рекомендації щодо практичної реалізації побудованих алгоритмів, наведено аналіз динамічних властивостей систем.

Синтез дискретних регуляторів здійснюється із застосуванням двох методик [1], [5], [6]. Одна з них полягає у використанні моделей об'єктів, які описують поведінку систем лише в дискретні (тактові) моменти часу та синтез цифрового регулятора в термінах  $z$ -перетворення [5]. Інший підхід навпаки пропонує обмежитися вихідним описом системи диференціальними рівняннями та синтезувати безперервні регулятори, які вже після синтезу реалізуються на мікропроцесорах [5]. Обидва ці підходи широко використовуються в практиці керування. Далі розглядаються обидва підходи до синтезу цифрового регулятора на прикладі системи стабілізації струму дуги.

Виберемо регулятор, що забезпечує заданий час перехідних процесів  $t_{\text{пер}}^* \leq 0,33$  мс,  $\sigma \leq 20\%$  і нульову помилку, що встановилася на ступінчасту дію. Регулятор має бути фізично реалізований, і синтезована система має бути грубою. Розв'язання задачі неоднозначно, тому подібно до [1], [5] введемо ключове поняття, пов'язане з проблемою синтезу регуляторів: еталонний оператор замкнутої системи  $\Phi(s)$  (еталонна передатна функція (ПФ)), який забезпечує задану у відомому сенсі якість процесів керування.

Як еталонні перехідні характеристики (бажані криві перехідного процесу) можна використовувати, зокрема, криві

$$h^*(t) = 1 - e^{-t/\tau} = i^*(t); \quad (1)$$

$$h^*(t) = \left[ H_0 + (H_1 - H_0) e^{-t/(\sqrt{2}\tau)} \sin \frac{t}{\sqrt{2}\tau} \right] \cdot 1(t),$$

де  $i^*(t)$  – еталонний вихідний сигнал; параметр  $\tau = t_{\text{пер}}^*/3$  ( $t_{\text{пер}}^*$  – задане число) характеризується заданим часом регулювання;  $H_1$  – амплітуда бажаного процесу для  $t = +0$ ;  $H_0$  – значення  $h(t)$  для  $t = \infty$  (астатизм системи).

Якщо  $H_1 = 0$ ,  $H_1 = 1$  (астатизм першого порядку),

то

$$h^*(t) = \left[ 1 - e^{-t/(\sqrt{2}\tau)} \sin \frac{t}{\sqrt{2}\tau} \right] \cdot 1(t).$$

Далі, виходячи з вимог, що пред'являються до системи, як еталонної перехідної характеристики вибираємо аперіодичний сигнал (1). Зображення цієї кривої

$$I^*(s) = \frac{s^{-1}}{\tau_x s + 1},$$

а відповідний функціонал, для якого ця крива є екстремаллю, має вигляд

$$J = \int_0^{\infty} [i^2 + \tau^2 (di/dt)^2] dt.$$

## III. МЕТА РОБОТИ

Метою роботи є вирішення теоретичних та практичних завдань щодо забезпечення цифрового керування імпульсним перетворювачем у режимі стабілізації вихідного струму із забезпеченням заданої тривалості перехідних процесів, викликаних збільшенням напруги навантаження та астатизму вихідного струму.

## IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ І АНАЛІЗ ОТРИМАННИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

*Схема цифрової системи регулювання струму дуги.* Функціонально-принципова схема цифрової системи регулювання струму дуги представлена на рис. 1. Система містить транзисторний перетворювач напруги на ключах  $K1-K4$ , що використовує технологію м'якої комутації ключів, навантаження з опором  $R_n$  і протиЕРС  $U_0$ , індуктивність  $L$ , безінерційний датчик струму ДС з коефіцієнтом передачі  $R_{\text{ДС}}$ , що складається в загальному випадку з первинного датчика та пристрою гальванічної розв'язки з підсилювачем, цифровий регулятор струму (ЦРС) та широтно-імпульсний модулятор, причому ШІМ-модуляція відповідає модуляції другого роду (ШІМ-2) [9-13].

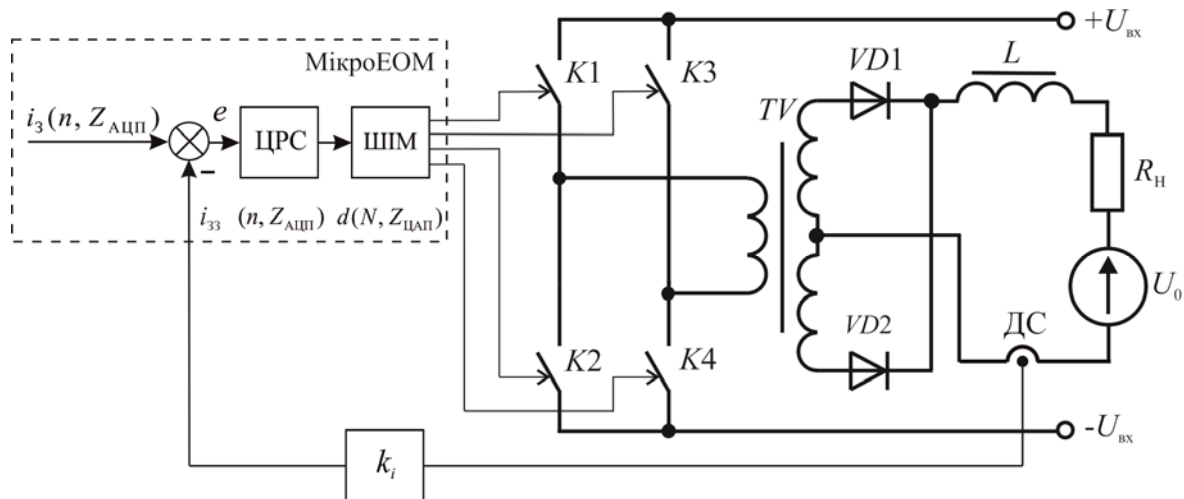
У загальному випадку обчислення керування в системі здійснюється в дискретні моменти  $n = t / T$ , комутація навантаження в моменти  $N = t / T_k$ .

Частоту дискретизації регулятора вибираємо рівною частоті дискретизації силової частини (частоті комутації ключів перетворювача).

Процес зміни струму у системі на рис. 1 складається з відрізків експонент, що характеризуються на  $n$ -му інтервалі керування виразом

$$i(t) = i(0) e^{-t/\tau_n} + (1 - e^{-t/\tau_n}) \frac{n U_{\text{вх}}}{U_m R_n} u_{\text{PT}},$$

де  $U_m$  – розмах (амплітуда) пилкоподібної напруги розгортки ШІМ;  $u_{\text{PC}}$  – вихідна напруга регулятора струму.



**Рисунок 1.** Функціональна принципова схема цифрової системи регулювання струму дуги, побудованої з урахуванням мостового перетворювача з фазовим керуванням (з м'яким перемиканням) [14], [15]

Очевидно, що він може бути лише наближений характером до бажаного (еталонного) експоненційного процесу з постійною часу  $\tau_x$  ( $\tau_x = t_{\text{пер}}^*/3$ ,  $t_{\text{пер}}^*$  – задане число)

$$i_e(t) = I_s(1 - e^{-t/\tau_x}).$$

Припустимо, що вхідна змінна є кусково-постійною на інтервалі дискретності тривалістю  $T$ . Тоді відповідна дискретна система описується рівнянням

$$i(n+1) = e^{-T/\tau_n} \cdot i(n) + (1 - e^{-T/\tau_n}) \frac{nU_{\text{ВХ}}}{U_m R_n} u_{\text{РС}}(n),$$

де  $i(nT)$  замінюється на  $i(n)$ , а  $u_{\text{РС}}(nT)$  – на  $u_{\text{РС}}(n)$ . При чисельних значеннях з [14, 15] і  $T = 0,00001$  одержуємо

$$i(n+1) = 0,852 \cdot i(n) + 29,6 \cdot u_{\text{РС}}(n).$$

Середня випрямлена напруга на навантаженні  $U_d(N)$  при її включенні в ланцюг джерела живлення на час  $2t_1(N)$  на  $N$ -му періоді комутації в статичному режимі дорівнює:

$$U_d(N) = nU_{\text{ВХ}} 2t_1(N) / T_k = nU_{\text{ВХ}} D(N, Z_{\text{АП}}),$$

де  $D(N, Z_{\text{АП}}) = 2t_1(N) / T_k$  – відносна тривалість включення навантаження в ланцюг джерела живлення  $U_{\text{ВХ}}$ ;  $Z_{\text{АП}}$  – еквівалентна розрядність ЦАП, обумовлена дискретністю формування інтервалу часу  $t_1(N)$ .

Середнє значення струму навантаження  $I_d$  без урахування комутаційних процесів

$$I_d = \frac{nU_{\text{ВХ}} 2t_1(N)}{T_k R_n}.$$

Імпульсний характер керування обумовлює на-

явність пульсацій у навантаженні та забезпечення заданого рівня їх є однією з основних вимог до системи керування джерела струму.

У квазістатичному режимі роботи системи розмах пульсацій струму  $\Delta i$  в активно-індуктивному навантаженні з параметрами  $R_n, L, \tau_n$ , ґрунтуючись на методі усереднення [14-16], визначається для  $T < \tau_n$  виразом

$$\Delta i = I_{\text{max}} - I_{\text{min}} = \frac{U_{\text{ВХ}}}{Lf} (1 - D),$$

$$\frac{\Delta i}{I_n} = \frac{R_n D}{Lf} \left( \frac{nU_{\text{ВХ}}}{U_{\text{ВХ}}} - 1 \right) = \frac{R_n}{Lf} (1 - D) = \frac{(1 - D)T}{\tau_n},$$

де  $nU_{\text{ВХ}}$  і  $U_{\text{ВХ}}$  – середні за період  $T$  значення вхідної та вихідної напруги;  $R_n = U_{\text{ВХ}} / I_n$ ;  $\tau_n = L / R_n$ . Під коефіцієнтом  $D$  розуміємо відношення  $2t_1 / T$  [14].

*Синтезований закон керування та результати імітаційного моделювання.*

*Заміна аналогової корекції алгоритмом мікроЕОМ.* Корекцію аналогової САК струмом дуги виконаємо за принципом формування бажаної ПФ замкнутої системи  $\Phi^*(s)$ .

Розглянемо систему керування струмом дуги, зображену на рис. 1, керований процес в якій описується передатною функцією

$$W_0(s) = \frac{k_0}{\tau_0 s + 1}.$$

Задана ПФ безперервного регулятора

$$W^r(s) = k_p \frac{\tau_0 s + 1}{s}, \quad (2)$$

де  $k_p = 1/(k_0\tau_x)$ , що забезпечує аперіодичний процес з бажаною постійною часу  $\tau_x$ .

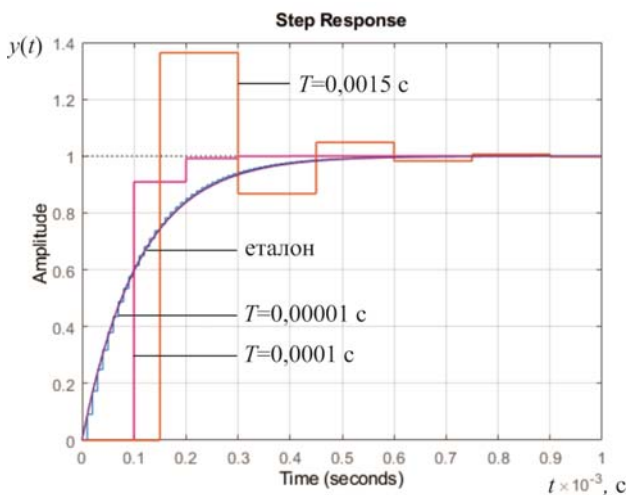
Замкнена система має ПФ

$$\Phi(s) = 1/(\tau_x s + 1).$$

Застосовуючи  $z$ -перетворення ( $s \leftarrow \frac{z-1}{Tz}$  – метод Ейлера) до (2), отримуємо ПФ цифрового регулятора

$$R(z) = k_p \cdot \frac{(\tau_0 + T)z - \tau_0}{z - 1}.$$

Перехідні процеси такої системи при одиничному ступінчастому задаючому впливі і різних періодах дискретизації  $T$  зображені на рис. 2.



**Рисунок 2.** Реакції цифрової системи керування струмом дуги на ступінчастий вхідний сигнал

При цьому, очевидно, відхилення перехідної характеристики цифрової моделі від дійсної перехідної характеристики безперервної системи збільшується зі збільшенням  $T$ ; при  $T = 0,002$  с процес стає нестійким.

При  $T = 0,0001$  с процес встановлюється за два періоди ( $0,2 \cdot 10^{-3}$  с) дискретності.

Очевидно, що чим менші обрані значення періоду дискретизації, тим більша точність такої апроксимації. Однак це вимагає застосування мікропроцесорів із підвищеною швидкодією, що призводить до подорожчання системи.

Найбільшого поширення на практиці при апроксимації операції інтегрування отримав підхід, заснований на чисельному інтегруванні методом трапецій – перетворення Тастина.

При цьому способі чисельного інтегрування відповідна  $z$ -передатна функція (ЗПФ) регулятора, очевидно, дорівнюватиме

$$R(z) = W^r(s) \Big|_{s=\frac{2}{T} \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}} = 2k_p(2\tau_0 + T) \times \frac{1 + [(T - 2\tau_0)/(T + 2\tau_0)]z^{-1}}{1 - z^{-1}}.$$

Обговоримо одержаний результат з точки зору ефективності застосування методу переобладнання на базі мікроЕОМ для створення еквівалентної цифрової системи. Розглянуте формальне розв'язання задачі може призводити до некоректних результатів. Це має місце у тих випадках, коли об'єкт є мінімально-фазовим. До недоліків можна віднести:

– складність обліку запізнення властивого цифровим системам керування;

– можливість отримання в деяких випадках нералізованого регулятора.

Тому після проведення синтезу цим способом необхідно виконати перевірку на стійкість та якість дискретної системи автоматичного керування (ДСАК).

Нижче розглянемо метод синтезу цифрових систем керування з цифровими регуляторами.

*Аналітичний синтез алгоритму керування мостовим перетворювачем напруги з м'яким перемиканням за заданими характеристиками ДСАК у  $z$ -формі.*

Цей метод впливає з накопиченого досвіду проектування дискретних систем, коли з раніше реалізованих ДСАК можна отримати інформацію про  $\Phi^*(s)$ .

Нехай ПФ наведеної безперервної частини імпульсної системи стабілізації струму, що включає екстраполятор нульового порядку, має вигляд

$$W_n(z) = \frac{k_0(1-d)}{z-d}, \quad d = \exp(-T/\tau_0),$$

причому  $k_0 = 12,81T$ ;  $\tau_0 = 625 \cdot 10^{-6}$  с [14];  $T$  – період квантування.

З частотних показників об'єкта неважко зробити висновок, що період квантування може бути заданим  $T = 0,00001$  с.

Розглянемо послідовний цифровий регулятор, що описується ПФ

$$R(z) = k_c \cdot \frac{z-d}{z-1} = k_c \frac{1-dz^{-1}}{1-z^{-1}}, \quad (3)$$

де  $k_c = \frac{1-a_0}{k_0(1-d)}$ ;  $a_0 = \exp(-T/\tau_x)$ ;  $\tau_x = t_{pez}^*/3$

( $t_{pez}^*$  – задане число).

Введення регулятора (3) призводить до компенсації полюса процесу та появи нового полюса  $z = 1$ . ПФ розімкненої системи з корекцією набуває просто-

го вигляду:

$$R(z)W_n(z) = \frac{1 - a_0}{z - 1}$$

Отриманий цифровий регулятор (3) має відставання фази ( $z_1 > p_1$ ).

Відповідна їй задана ПФ замкнутої еталонної системи

$$\Phi^*(z) = \frac{1 - a_0}{z - a_0}$$

Алгоритм може бути заданий як у вигляді  $z$ -зображення (3), так і у вигляді рекурентної формули

$$u(kT) = u[(k-1)T] + k_c [e(kT) - \hat{d}e(k-1)T],$$

де  $u$  – вихідна, а  $e$  – вхідна цифрові дискрети.

Можна отримати частотну передатну функцію мікроЕОМ

$$R^*(j\lambda) = R\left(\frac{1 + j\lambda T/2}{1 - j\lambda T/2}\right) = k_c \frac{1 - d}{T} \frac{1 + j\lambda\tau}{j\lambda}$$

де  $\tau = T(1 + d) / [(1 - d)2]$ .

З отриманого виразу видно, що дискретний фільтр здійснює інтегрування та підйом верхніх частот.

У цьому випадку облік дискретних властивостей системи вже на етапі синтезу дозволяє отримати закони регулювання, що забезпечують задану якість навіть за відносно великих періодів дискретності.

На рис. 3 представлені перехідні характеристики в системі регулювання струму дуги з параметрами [14]: сумарний омичний опір силового ланцюга  $r_\Sigma = 0,01$  Ом, постійна часу ланцюга навантаження  $\tau_0 = 625 \cdot 10^{-6}$  с, напруга живлення  $U_{вх} = 540$  В, заданий струм  $I_3 = 100$  А, амплітуда пилоподібного сигналу  $U_m = 2,5$  В,  $Z_{цщ} \rightarrow \infty$ ,  $Z_{цщ} \rightarrow \infty$  для періодів дискретності  $T = T_k$ .

На рис. 3 представлені перехідні характеристики цифрової системи керування струмом дуги для кількох значень періоду квантування  $T$ . Зазначимо, що представлені процеси в системі з параметрами ПП-регулятора (3), що формують гранично допустимий експоненційний процес при відпрацюванні стрибка завдання (переналаштування регулятора), близькі до еталонного процесу (1), відрізняючись лише на величину пульсацій струму в перехідному і квазістатичному режимах. Для порівняння на рис. 3 представлена перехідна характеристика еталонної безперервної системи. При цьому, як і очікувалося, процеси в системі, що досліджується, збігаються з еталонним лише в моменти часу  $t = nT, n = 0, 1, \dots$

$$i(n) = i_c(n)$$

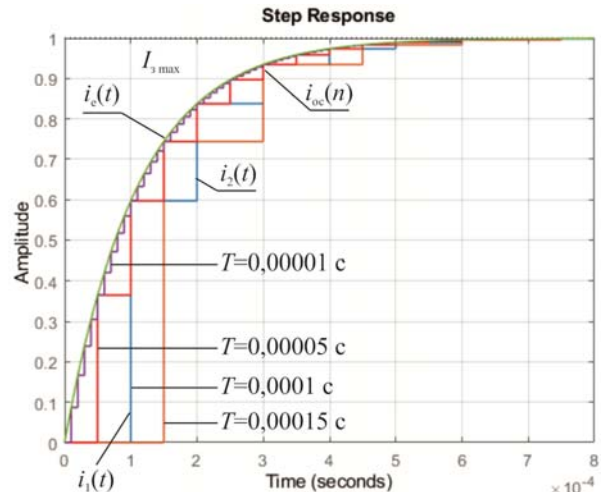


Рисунок 3. Еталонний експоненційний процес  $i_c(t)$  та процеси в досліджуваній системі  $i(t)$

Процеси з таким регулятором, як видно із рис. 3, практично не змінюються при зміні періоду дискретизації і залишаються стійкими. При цьому вихідна змінна системи  $i$  в моменти квантування точно відповідає бажаному процесу за будь-яких  $T$ .

Для досить малих періодів повторення  $T$  приблизно можна покласти

$$e^{-T/\tau_x} = 1 - T/\tau_x$$

і, отже,

$$\Phi^*(z) = \frac{T/\tau_x}{z - 1 + T/\tau_x}$$

Розглянемо характеристичне рівняння замкнутої системи

$$z - 1 + T/\tau_x = a_0 z + a_1 = 0$$

Відповідно до умов стійкості [2] маємо

$$a_0 + a_1 > 0, a_0 - a_1 > 0$$

$$\text{або } 1 + \frac{a_1}{a_0} > 0, 1 - \frac{a_1}{a_0} > 0$$

Область стійкості зображено на рис. 4. Вона відповідає відрізьку  $(-1, 1)$  на прямій.

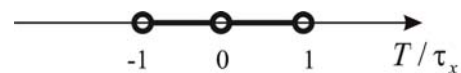


Рисунок 4. Область стійкості

Умова стійкості

$$T/\tau_x < 2$$

Виберемо  $T/\tau_x = 1$ . При цьому ПФ замкнутої

системи дорівнюватиме

$$\Phi(z) = \frac{1}{z}$$

Зображення вихідної величини

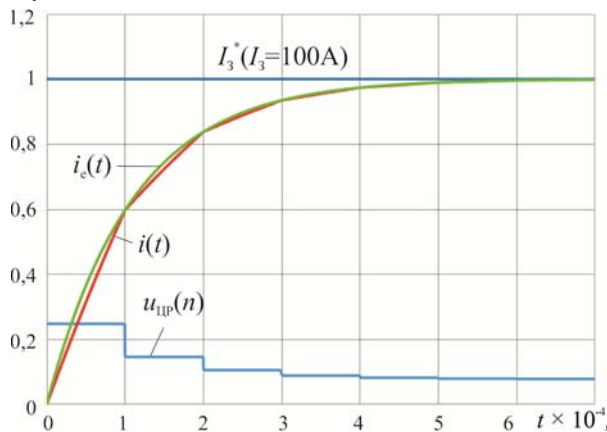
$$Y(z) = \Phi(z)G(z) = \frac{1}{z-1}$$

Розклавши останній вираз у ряд Лорана, маємо

$$\frac{1}{z-1} = z^{-1} + z^{-2} + z^{-3} + \dots$$

Це дає наступні значення функції  $y$  на виході в дискретні моменти часу: при  $t=0$   $y=0$ ; при  $t=T$   $y=1$ ; при  $t=2T$   $y=1$  і далі  $y=1$  при всіх значеннях  $t=mT$ . Це означає, що вихідний сигнал системи  $y(mT)$  досягає необхідного значення за один період квантування. Перерегулювання  $y(mT)$  дорівнює нулю.

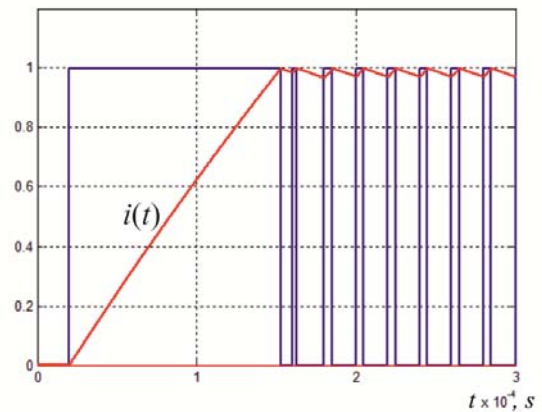
На рис. 5 показана реакція замкнутої системи на ступінчасту зміну заданої точки не тільки в моменти квантування, а й проміжні інтервали; реакцію отримано при моделюванні безперервної системи. Система має гарну реакцію, не таку швидку, як аперіодична реакція [5], проте з меншими амплітудами вхідного сигналу.



**Рисунок 5.** Перехідні процеси в цифровій системі керування струмом дуги з ШІМ-2 з регулятором (3) при  $T=0,0001$  с

На рис. 6 представлені часові діаграми сигналу з ШІМ і струму на виході перетворювача при відпрацюванні стрибка задаючого впливу  $U_{зс} = 6,15$  В.

З рис. 6 видно, що в кінці четвертого періоду перехідний процес входить в лінійну зону і, починаючи з п'ятого періоду, спостерігається встановлений режим роботи. Відхилення середнього значення струму у встановленому режимі від значення  $U_{зс} / (k_I R_{дс})$  становить 0,021 А.



**Рисунок 6.** Осцилограми відпрацювання стрибка задаючого впливу  $U_{зс} = 6,15$  В при нульових початкових умовах (реакція цифрової системи керування струмом дуги на ступінчасту зміну заданої точки 100 А)

Застосування другого підходу, який отримав назву принципу динамічної компенсації, зводиться до тієї чи іншої форми апроксимації співвідношення оператора регулятора [3]. Така апроксимація спрямована на:

1. спрощення структури регулятора;
2. можливість отримання фізично реалізованих елементів;
3. забезпечення стійкості замкнутої системи;
4. підвищення властивостей грубості.

Тут, як і попередньому випадку, процес проектування може повторюватися неодноразово і є варіантом методу проб.

Час регулювання синтезованої системи може бути скориговано у бік його зменшення.

Вище бажаною була обрана ПФ виду (1). У методиці синтезу нічого не зміниться, якщо відповідно з вимогою до характеру перехідного процесу доведеться прийняти другу ПФ.

Компенсація постійної часу об'єкта може бути здійснена, у загальному випадку, за допомогою ПІ- або ПД-регулятора [4].

Застосовуючи ПІ-регулятор [4]

$$u_{II}(n) = e(n)k_{II} = (i_3(n) - i_{ос}(n))k_{II},$$

$$u_I(n) = u_I(n-1) + k_I e(n-1),$$

$$u_{III}(n) = u_{II}(n) + u_I(n),$$

та вибираючи коефіцієнти передачі  $k_{II}$ ,  $k_I$  його пропорційного та інтегрального каналів на підставі виразів [4]

$$k_{II} = \frac{R_n(1 - \exp(-T/\tau_x))}{k_{dT} \frac{nU_{вх}}{U_m}(1 - \exp(-T/\tau_x))},$$

$$k_I = R_n(1 - \exp(-T/\tau_x))/(k_{дс}nU_{вх}/U_m)$$

в системі забезпечуються при відпрацюванні стрибків завдання перехідні процеси близькі до еталонного експоненційного процесу  $i_c(t)$  з постійною часу  $\tau_x$  в еквівалентній моделі

$$W^*(s) = I_e(s)/I_s(s) = 1/(\tau_x s + 1), T \leq \tau_x.$$

При виконанні умови  $T \ll \tau_x$  вибір коефіцієнтів передачі регулятора здійснюється на підставі співвідношень

$$k_{II} = \tau_0 R_n / (TnU_{вх} k_{дс} / U_m),$$

$$k_I = R_n / (TnU_{вх} k_{дс} / U_m).$$

Очевидно, що аперіодичний процес можна отримати тільки у випадку, коли відбувається ідеальна компенсація полюсів та нулів [8]. На практиці невідзначеність нулів та полюсів об'єкта керування, що виникає ще на стадії його опису та обмеження в реалізації ПФ регулятора на мікропроцесорі призводить до того, що досягти ідеального аперіодичного процесу неможливо [4, 8].

При варіаціях параметрів незмінної частини та неточностях у реалізації передатної функції  $R^*(z)$  забезпечити отримання даної якості перехідних процесів у цифровій системі керування джерела струму можна шляхом обґрунтованого застосування сучасних методів адаптації для керування нестационарними об'єктами. При всій різноманітності підходів, методів і алгоритмів адаптивного керування доцільніше скористатися схемою з еталонною моделлю і сигнальним налаштуванням [2, 3], простою у реалізації і яка володіє високою швидкістю.

## V. ВИСНОВКИ

Наведені вище співвідношення дозволяють вибрати параметри інформаційної та енергетичної підсистем джерела струму дуги з умови забезпечення заданого часу регулювання за допустимого рівня пульсацій струму дуги (заданої частоти комутації силових ключів) у статичному режимі.

При зміні напруги живлення  $U_{вх}$  і параметрів об'єкта та навантаження  $\tau_0$ ,  $R_n$ ,  $U_0$  у широкому діапазоні для забезпечення заданої якості процесів у цифровій системі стабілізації струму дуги виникає необхідність застосування адаптивної схеми з еталонною моделлю і сигнальним налаштуванням.

Описаний процес проектування цифрового регулятора в тому числі і з затримкою, що вноситься АЦП і ЦШІМ, може бути основою для проектування імпульсних джерел електроживлення дуги з повністю цифровим керуванням із забезпеченням заданої тривалості перехідних процесів, викликаних збільшенням напруги навантаження і астатизму вихідного струму.

Подальшим розвитком може бути використання нелінійних динамічних коректорів та адаптивних систем.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Куо Б. Теория и проектирование цифровых систем управления: Пер. с англ. – М.: Машиностроение, 1986. – 448с.
- [2] Бессекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления. – СПб.: Профессия, – 2003. – 700 с.
- [3] Ким Д.П. Теория автоматического управления. Т.1. Линейные системы. Изд. второе, исправленное и дополненное. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 304 с.
- [4] Кротенко В.В. Параметрический синтез цифровых систем управления с транзисторными широтно-импульсными преобразователями // Изв. вузов Приборостроение. 2003. Т.46. №6. С.25-31.
- [5] Изерман Р. Цифровые системы управления. – М.: Мир, 1984. – 460 с.
- [6] Silva G.J., Datta A., Bhattacharyya S.P. PID Controllers for Time-Delay Systems. – Boston: Birkhauser. – 2005. – 330 p.
- [7] Gu Da-Wie., Petkov P.Hr., Konstantinov M.M. Robust Control Design with MATLAB. Springer-Verlag. – 2005. – 390 p.
- [8] Крутько П.Д. Обратные задачи динамики управляемых систем: Линейные модели. – М.: Наука, 1987. – 304 с.
- [9] Jang Y., Jovanovic M. A new PWM ZVS full-bridge converter. / IEEE Transactions on Power Electronics. – 2007. – Vol. 22 (3). – P. 987-994. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2007.897008>
- [10] Yang B., Duarte J., Li W., Yin K., He X., Deng Y. Phase-shifted full bridge converter featuring ZVS over the full load range. / IECON 2010 – 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, 2010. – Pp. 644-649.
- [11] Ilchmann A., Eugene P. Ryan E. High-gain control without identification: a survey. / GAMM-Mitteilungen. – 2008. – Vol. 31(1). P. 115 – 125. <https://doi.org/10.1002/gamm.200890000>
- [12] Minimum Time Control for Multiphase Buck Converter: Analysis and Application / Cheng P., Vasic M., Garcia O., Oliver J.A., Alou P., Cobos J.A. // IEEE Transactions on Power Electronics. 2014. Vol. 29, Issue 2. Pp. 958 – 967. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2013.2256798>
- [13] Zhao Z., Prodic A. Continuous-Time Digital Controller for High-Frequency DC-DC converters. /

IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 23, no. 2 March 2008, pp. 564-573.

<https://doi.org/10.1109/KhPIWeek61412.2023.10312905>

[14] Аналіз перетворювача постійного струму, що працює на плазмову дугу / Є.М. Верещаго, В.І. Костиюченко, С.М. Новогрецький // Електротехніка і електромеханіка, 2023, №5, 31–36. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2023.5.05>

[16] Digital Control System of a Pulsed Power Supply for the Plasmatro / E. Vereshchago, V. Kostiuchenko, S. Novogretskyi // 2023 IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES). P.30-34. <https://doi.org/10.1109/MEES61502.2023.10402495>

[15] Synthesis of a Control System of a Pulse Converter for Plasmatron Power Supply / E. Vereshchago, V. Kostiuchenko, Y. Stohniienko // 2023 IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek). P.394-397.

Стаття надійшла до редакції 03.09.2024

## PULSE CURRENT STABILIZER WITH DIGITAL CONTROL FOR THE POWER SUPPLY SYSTEM OF THE PLASMATRON

VERESHCHAGO E.M. PhD, Associate Professor of the Department of Marine Instrument, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: [venmkua@gmail.com](mailto:venmkua@gmail.com);

KOSTIUCHENKO V.I. PhD, Associate Professor of the Department of Marine Electric Power Systems, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: [vitalii.kostiuchenko@nuos.edu.ua](mailto:vitalii.kostiuchenko@nuos.edu.ua);

**Purpose.** Solution of theoretical and practical problems on providing digital control of a pulse converter using high-speed microprocessor tools in the output current stabilization mode with provision of a specified duration of transient processes caused by an increase in load voltage and output current astaticity, which allows to obtain significant advantages over analog versions.

**Methodology.** Review of literary and patent sources on the subject, theory of pulse automatic control systems, mathematical modeling of processes in pulse current stabilizers in the MATLAB / Simulink software environment and physical prototyping.

**Findings.** A simulation model of an autonomous power supply system based on a converter using soft switching technology of transistors and an arc load is presented. A control law is synthesized and a model of a pulse current stabilizer is developed. A method is proposed and ways are found to control a pulse current stabilizer that provide a given duration of transients and astaticism of the output current. A model of a pulse stabilizer with digital control based on a single-crystal computing module is developed and manufactured. The results of the study confirm the achievement of a finite duration of transient processes caused by a step change in the load voltage, close to 3-4 periods of conversion and output current astaticism. It is shown that the use of a pulse stabilizer using a fully digital control circuit has undeniable advantages over analog systems.

**Originality.** The problem of synthesizing a digital controller for a given control time by the method of desired transfer functions for a soft switching operating converter on an arc load is solved. In addition to the given control time, additional quality requirements in the steady state are provided.

**Practical value.** The use of microprocessor technology makes it possible not only to implement complex and new highly efficient control algorithms for a converter operating in the pulse current stabilizer mode, but also to perform additional functions for overload protection, self-diagnostics and telemetry of pulse converters. The use of this same digital device simultaneously for the purpose of controlling a pulse converter will allow to abandon analog PWM controllers and thereby reduce its own energy consumption and weight and size characteristics, increase the reliability of the functioning of pulse converters in power supply systems as a whole.

**Keywords:** pulse current stabilizer; digital control circuit; duration of the transition process; desired transfer function; simulation model; synthesis; astaticism; reference transient characteristic

### REFERENCES

[1] Kuo B. Theory and Design of Digital Control Systems: Trans. from English. Moscow: Mashinostroenie, 1986, 448 p.

[2] Bessekersky V.A., Popov E.P. Theory of Automatic Control Systems. St. Petersburg: Profession, 2003. 700 p.

[3] Kim D.P. Theory of Automatic Control. Vol. 1. Linear Systems. Second ed., corrected and

- supplemented. Moscow: FIZMATLIT, 2007, 304 p.
- [4] Krotenko V.V. Parametric Synthesis of Digital Control Systems with Transistor Pulse-Width Converters // News of the Universities of Instrument Engineering. 2003. Vol. 46. No. 6. P. 25-31.
- [5] Izerman R. Digital Control Systems. Moscow: Mir, 1984, 460 p.
- [6] Silva G.J., Datta A., Bhattacharyya S.P. PID Controllers for Time-Delay Systems. Boston: Birkhauser. 2005. 330 p.
- [7] Gu Da-Wie., Petkov P.Hr., Konstantinov M.M. Robust Control Design with MATLAB. Springer-Verlag. 2005. 390 p.
- [8] Krutko P.D. Inverse problems of dynamics of controlled systems: Linear models. Moscow: Nauka, 1987. 304 p.
- [9] Jang Y., Jovanovic M. A new PWM ZVS full-bridge converter. / IEEE Transactions on Power Electronics. – 2007. – Vol. 22 (3). – P. 987-994. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2007.897008>
- [10] Yang B., Duarte J., Li W., Yin K., He X., Deng Y. Phase-shifted full bridge converter featuring ZVS over the full load range. / IECON 2010 – 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, 2010. – Pp. 644-649.
- [11] Ilchmann A., Eugene P. Ryan E. High-gain control without identification: a survey. / GAMM-Mitteilungen. – 2008. – Vol. 31(1). P. 115 – 125. <https://doi.org/10.1002/gamm.200890000>
- [12] Minimum Time Control for Multiphase Buck Converter: Analysis and Application / Cheng P., Vasic M., Garcia O., Oliver J.A., Alou P., Cobos J.A. // IEEE Transactions on Power Electronics. 2014. Vol. 29, Issue 2. Pp. 958 – 967. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2013.2256798>
- [13] Zhao Z., Prodic A. Continuous-Time Digital Controller for High-Frequency DC-DC converters. / IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 23, no. 2 March 2008, pp. 564-573.
- [14] Analysis of a direct current converter operating on a plasma arc. / E.M. Vereshchago, V.I. Kostiuchenko, S.M. Novogretsky // Electrical engineering and electromechanics, 2023, No. 5, 31–36. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2023.5.05>
- [15] Synthesis of a Control System of a Pulse Converter for Plasmatron Power Supply / E. Vereshchago, V. Kostiuchenko, Y. Stohniienko // 2023 IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek). P.394-397. <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek61412.2023.10312905>
- [16] Digital Control System of a Pulsed Power Supply for the Plasmatro / E. Vereshchago, V. Kostiuchenko, S. Novogretskyi // 2023 IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES). P.30-34. <https://doi.org/10.1109/MEES61502.2023.10402495>



УДК 62-83:681.52

## СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ МОСТОВОГО КРАНУ З УРАХУВАННЯМ ПРУЖНИХ ЗВ'ЯЗКІВ

ОЛЕЙНИКОВ М.О. аспірант, кафедра електроприводу та автоматизації промислових установок Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: oleinikov.m@gmail.com, ORCID: 0000-0001-5999-5733;

**Мета роботи.** Дослідження особливостей роботи системи автоматичного керування електроприводом мостового крана з урахуванням пружних зв'язків.

**Методи дослідження.** Для досягнення поставленої мети були використані методи системного аналізу та моделювання за допомогою програмних засобів. Це дозволило точно відобразити процеси, що відбуваються в системі, а також перевірити різні сценарії роботи та їхній вплив на загальну ефективність системи.

**Отримані результати.** У ході дослідження було розглянуто систему автоматичного керування електроприводом та важливість урахування пружних зв'язків. Запропонована адаптивна система використовує нейронну мережу RBF. Використання запропонованого регулятора забезпечує стійкість до збурюючих впливів і дозволяє нівелювати коливання вантажу. Адаптивність системи забезпечується при зміні параметрів (навантаження, швидкість руху механізмів, жорсткість, точність позиціонування тощо) для відповідності умовам роботи мостового крана. Завдяки цьому, система здатна ефективно працювати в умовах змінних навантажень і зовнішніх впливів. Проведено комп'ютерне моделювання запропонованої системи керування, що підтвердило її ефективність при різних умовах експлуатації.

**Наукова новизна.** Наукова новизна роботи полягає в розробці та обґрунтуванні адаптивної системи керування електроприводом мостового крана, яка враховує пружні зв'язки. Дана система забезпечує гасіння коливань вантажу та підвищує точність позиціонування крана. Це досягається шляхом порівняння з існуючими методами керування за різними критеріями. Запропоновано використання алгоритму адаптації параметрів системи керування в реальному часі (навантаження, швидкість руху візка, довжина троса, жорсткість механізмів, тощо), що значно покращує (на 5-7% точність позиціонування, на 8-10 % стабільність роботи) показники роботи системи. Крім того, в ході дослідження було підтверджено здатність системи адаптуватися до різних умов роботи (змінене навантаження, варіації швидкості руху, нерівномірність дії зовнішніх збуджень), забезпечуючи стабільність і надійність її функціонування, що особливо важливо для забезпечення безперервної роботи крана в промислових умовах.

**Практична цінність.** Застосування даної системи дозволяє підвищити продуктивність мостового крана на 5-10% порівняно з традиційними системами керування. Впровадження системи в промислових умовах дозволить значно покращити ефективність і безпеку роботи крана, а також знизити витрати на технічне обслуговування і ремонт. Крім того, дана система може бути використана для модернізації вже існуючих кранів, що дозволить подовжити термін їх експлуатації та підвищити надійність роботи. Це відкриває нові можливості для підвищення ефективності промислових процесів, пов'язаних з використанням мостових кранів, і забезпечує кращі умови праці для операторів.

**Ключові слова:** кранові механізми, мостовий кран, електропривод, система автоматичного керування, адаптивна система, пружні зв'язки.

### I. ВСТУП

В сучасному логістичному процесі виробництва мостові крани відіграють провідну роль. Безвідмовність, надійність, швидкість мостового крана має великий вплив на ефективність виробництва.

Під час експлуатації механізмів мостового крана виникають велика кількість поломок, які пов'язані зі змінами навантажень електроприводів мостового крана. Дані навантаження мають вигляд перехідного процесу механічної підсистеми, що має пружні властивості.

Саме тому, проектувальники мостових кранів повинні враховувати фактори впливу на ефективність

роботи мостового крана, такі як: динамічні навантаження, адаптивність до змінних умов, точність керування, безпека та надійність, ефективність, економічність та доцільність.

В останні роки було запропоновано велику кількість методів керування мостовими кранами, однак значна частина даних методів не враховує вплив пружних зв'язків.

Пружні зв'язки виникають через властивість гнучкості конструктивних елементів мостового крана, наприклад трос або балка. Критично важливим для точності позиціонування та зменшення коливань вантажу під час транспортування є врахування цих зв'язків. Таким чином, серед головних напрямків під-

вищення надійності мостового крана є питання зниження динамічних навантажень на їхні елементи, досягається це шляхом використання електроприводу, який має відповідну систему керування, що формує керуючий вплив, враховує поточний стан навантаження на елементи механічних системи та перешкоджає розвитку перехідних процесів коливального характеру.

У статті розглянуто систему керування електроприводом мостового крана, яка буде враховувати пружні зв'язки.

## II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Електроприводи кранових механізмів за характером навантажень можна розділити на дві групи: з переважно активним статичним моментом і переважно з реактивним моментом. До першої групи належать електроприводи вантажних лебідок і стрілових лебідок із неврівноваженою стрілою, а до другої групи – електроприводи механізмів горизонтального пересування [1].

У роботі [2] було виконано розрахунок оптимальної за динамічними навантаженнями механічної характеристики під час гальмування двоступеневим протиувімкненням механізму пересування вантажопідйомного крана. Серед недоліків цього дослідження слід відзначити зневаження одним із найважливіших параметрів гальмування електродвигуном - втрати енергії, які для гальмування протиувімкненням велими високі і є його істотним недоліком.

У дослідженні [3] розглядається питання мінімізації середньоквадратичного значення зусилля, що діє в головній балці мостового крана, під час переміщення вантажу в горизонтальній площині. Але також як і в попередній роботі розглянуто тільки процес пуску крана.

У науковій роботі [4] запропоновано стратегію генерування оптимальної форми командного профілю для зменшення залишкових вібрацій при маневрах крана з упору в упор. Використана методика ґрунтується на генеруванні в дискретному часі фазового профілю прискорення. Цей профіль враховує одночасні маневри пересування та підйому за наявності демпфування. Дискретний профіль прискорення будується аналітично за допомогою відрізків зі скінченним кроком.

У роботі [5] розглядають проблему небажаних коливань, спричинених рухами, керованими оператором. Ці коливання знижують можливі робочі швидкості та погіршують безпеку здвоєних кранів, що переміщують вантажі з розподіленою масою. Автори розробили новий метод прогнозування власної частоти здвоєних плоских кранів з різною довжиною кабелю. Крім того, запропоновано модифікований надчутливий (MEI) формувач вхідного сигналу для придушення коливань корисного вантажу у здвоєних кранах.

У статті [6] представлено загальну математичну

модель розімкнутого кінематичного ланцюга з допоміжними підланцюгами, застосовану для аналізу динаміки зразкового стрілового крана.

Математична модель була успішно перевірена за використанням комерційної програми MSC.Adams і програмного інтерфейсу ANSYS-MSC.Adams, а також оцінено вплив вищезгаданих факторів на поведінку вантажу і приводів крана за допомогою показників кінетичної енергії та позиціонування.

У дослідженні [7] запропоновано інформаційну систему, яка за допомогою чотирьох тестів дозволяє отримати залежності імпульсів від переміщення вагона по осі X та рейки по осі Y, а також залежності переміщення вагона та рейки від часу, результати яких продемонстровано.

У роботі [8] зроблено набір експериментів з керування в реальному часі, застосованих до нелінійної системи.

У дослідженні [9] проведено аналіз використання кранів для транспортування вантажу дуже поширене в будівництві. Наголошено, що переміщення вантажу за допомогою крана є непростим завданням, особливо коли необхідно дотриматись суворих специфікацій щодо кута повороту та часу переміщення вантажу.

У роботі [10] представлена динамічна модель 3D-крана, до якої застосовано методи штучного інтелекту синтезовано та застосовано до моделі методи штучного інтелекту: Fuzzy логічного керування (FLC) та адаптивної нейронної системи нечіткого виводу (ANFIS).

Система адаптивного нейронного нечіткого виводу (ANFIS) має на меті мінімізацію кутів повороту при збереженні опорної траєкторії у трьох осях. Реалізоване керування також було піддано тестуванню на стійкість до зовнішніх збурень.

У роботі [11] запропоновано новий дворівневий ієрархічний підхід до керування положенням візка та розгойдуванням вантажу мостового крана. На першому рівні досліджується проста математична модель маятника з урахуванням часової затримки через використання системи технічного зору.

У статті [12] описується лабораторний комплекс мостового крана, який використовується для дослідження принципів роботи сучасного асинхронного електроприводу та систем керування технологічними об'єктами. Він призначений для виконання лабораторних робіт студентами електромеханічних спеціальностей, а також для тестування наукових рішень, що стосуються електроприводів кранів. Комплекс реалізований на основі вбудованих систем. Основною метою є розробка рекомендацій щодо вдосконалення електромеханічної системи мостового крана з метою розширення її функціональності шляхом підвищення рівня автоматизації.

У роботі в процесі пересування проведено аналіз

існуючих підходів до вирішення проблеми та запропоновано новий підхід, який враховує зростаючу актуальність питань енергозбереження, впровадження антиперекісних технологій і, зокрема, систем керування. З іншого боку, він базується на використанні сучасних інформаційних технологій. Проведено математичне та експериментальне моделювання пружної моделі крана. Обговорюються перспективи подальшого застосування отриманих результатів.

Серед актуальних проблем та недоліків сучасних досліджень в галузі автоматичного керування електроприводом мостового крана слід виділити наступне: недостатньо враховуються реальні умови експлуатації, дослідження проводяться в лабораторних умовах, що ускладнює врахування всіх факторів, що впливають на роботу мостового крана в реальних промислових умовах; відсутність універсальності та адаптивності системи; алгоритми, які пропонуються дослідниками мають високу ефективність, але за певних умов, та не є універсальними для різних умов експлуатації. Крім того, системи керування часто вимагають точно налаштування цілого масиву параметрів, що в свою чергу, ускладнює введення їх в експлуатацію; численні дослідження не завжди в повній мірі приділяють увагу безпеці, при цьому техніка безпеки в експлуатації таких систем є ключовим аспектом; потребує окремого дослідження інтеграції системи запобігання зіткненням та інших безпекових заходів в існуючі або нові системи керування. Під час використання спрощених математичних моделей у дослідженнях не враховується безліч факторів, що потребує більш поглиблених досліджень та складніших моделей для адекватного відображення поведінки системи під дією зовнішніх факторів. Сучасні моделі та технології часто вимагають значних фінансових витрат на модернізацію наявного обладнання та впровадження нових систем керування, що не завжди є доцільним.

Отже, актуальним є розробка сучасних універсальних адаптивних систем керування електроприводом мостового крана, які будуть враховувати умови експлуатації, будуть більш безпечними, ефективними, економічними та потребуватимуть мінімум фінансових витрат на впровадження та модернізацію.

### III. МЕТА РОБОТИ

Мета роботи – розробка та дослідження адаптивної системи автоматичного керування електроприводом мостового крана, яка враховує пружні зв'язки та дозволяє підвищити точність позиціонування, стабільність, продуктивність системи та забезпечити ефективну роботу крана в промислових умовах.

Бажані результати: зменшення коливань вантажу під час руху та гальмування мостового крана; адаптація системи до змінних умов експлуатації; забезпечення стабільності під час роботи; підвищення точності позиціонування візка.

### IV. СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ПЕРЕМІЩЕННЯ МОСТОВОГО КРАНУ

Мостовий кран представляє собою механізм, у якого в якості несучої конструкції виступає міст у вигляді з'єднаних між собою прогонових і кінцевих балок. На пролітній балці є простір для пересування вантажного візка (талі, тельфера), до якого кріпиться вантажозахоплювальний пристрій (звичайний гак, магнітний пристрій, грейфер тощо). Основний простір промислового майданчика не зайнятий під час використання мостового крана, оскільки візок переміщується підйомним механізмом по мосту над самим майданчиком, даючи змогу транспортувати вантаж на всій території, що обслуговується краном.

Мостовий кран (рис.1) має сталеву конструкцію 1, що спирається на ходові візки за допомогою механізму пересування 3. Відбувається переміщення по шляхах 2, які закріплено над площею. Вздовж моста крана прокладені рейки, на них переміщається візок за допомоги механізму пересування та підйомною лебідкою. Підйомна лебідка виконує функцію підйому та спуску вантажів.



1 – міст; 2 – шляхи; 3 – механізм пересування; 4 – візок; 5 – гак

**Рисунок 1.** Загальний вигляд та конструкція мостового крана

Сучасні мостові крани діляться за конструкцією таким чином:

- однобалочні: містять у собі двотаврову балку як основу, яка кріпиться до кінцевих балок;
- двобалочні: складаються з двох паралельних балок.

Електричний привод застосовується для переважної більшості мостових кранів усіх типів і призначень. Електричний привод застосовується для вантажопідйомних механізмів потужності від 0,2 до 300 кВт при живленні від мереж змінного трифазного струму напругою 380 В або мереж постійного струму напругою 220 В і 440 В [13]. Для особливо потужних кранових механізмів (потужністю понад 300 кВт) можливе живлення від трифазних мереж напругою 6-10 кВ.

Точність та надійність є головними визначальними факторами в управлінні електроприводом мостового крана. Найбільш розповсюджені алгоритми керування електроприводом включають прості методи, що засновані на класичній теорії управління, та

більш складні адаптивні інтелектуальні системи.

Дуже важливим в контексті забезпечення надійності, безпеки та точності є врахування пружних зв'язків в алгоритмах керування електроприводом мостового крана, оскільки саме пружні зв'язки мають вагомий вплив на динаміку системи, створюючи коливання на додаткові навантаження, які в кінцевому результаті можуть призвести до аварії, поломки або зношенню механізмів.

Алгоритми керування електроприводами в більшості є багатозадачними, мають функцію забезпечення швидкості, точності, замінують дію висококваліфікованого персоналу.

Під час розроблення алгоритмів керування необхідним є врахування можливих змін параметрів системи (вага вантажу, довжина троса), питання практичної реалізації (максимальне прискорення та швидкість, величина керувального впливу і т.д.)

Класичне керування за відхиленням із послідовною і паралельною корекцією стало підставою для створення таких способів керування, як підпорядковане, векторне, адаптивне керування, які дають змогу забезпечити високі динамічні та регульовальні властивості [14].

Представляючи електропривод найпростішою структурною схемою на рис., необхідно пам'ятати, що неврахування пружних механічних зв'язків завжди тією чи іншою мірою спотворює фактичний характер процесів.

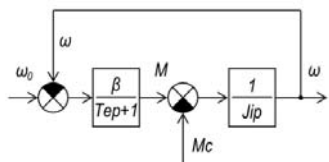


Рисунок 2. Структурна схема електроприводу з лінійною механічною характеристикою

Поряд з завданнями, для вирішення яких в конкретних умовах ці спотворення не мають істотного значення, є широке коло практичних питань, правильно розв'язати які без урахування пружностей неможливо. Під час вирішення завдань слід оцінювати пружні зв'язки на динаміку електромеханічної системи. Саме тому аналіз особливостей взаємодії електропривода з механізмом, що має пружні зв'язки в єдиній системі несе практичне значення [14].

Проведемо аналіз впливу пружних зв'язків за допомогою узагальненої структури електромеханічної системи, представленої на рис.3.

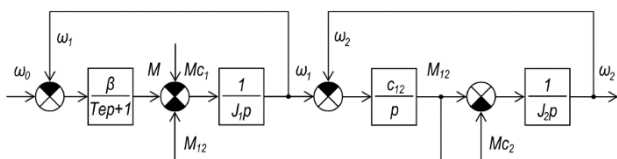


Рисунок 3. Структурна схема узагальненої системи електроприводу з двигуном, що має лінійну механічну характеристику

Для зручності аналізу процесів з управління покладемо  $MC_1=MC_2=0$  і скористаємося перетвореною структурною схемою механічної частини.

Отримана таким чином структурна схема електроприводу з пружним зв'язком має вигляд:

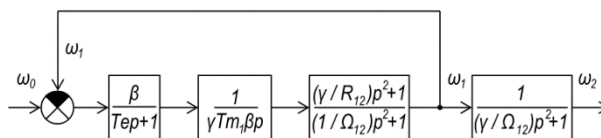


Рисунок 4. Перетворена структурна схема двомасової пружної системи

Передавальні функції механічної частини виражені через узагальнені параметри:

$$y, \Omega_{12} \text{ та } T_{m1} = J_1 / \beta \text{ при цьому } yT_{m1}\beta = J_{\Sigma} \quad (1)$$

Звертаючись до аналізу властивостей механічної частини, можна зробити висновок, що в структурі на рис. 3 механічна частина об'єкта являє собою консервативну коливальну ланку, у якій за  $M=\text{const}$  механічні коливання, що виникли, за прийнятих припущень не затухають. Однак, розглядаючи схему на рис. 3, можна встановити, що коливання швидкості двигуна, за-вдяки наявності внутрішнього зворотного зв'язку за швидкістю в системі електроприводу, мають викликати коливання моменту, зумовлені динамічною жорсткістю механічної характеристики:

$$M(p) = -\beta\omega_1(p) / (1 + T_{ep}) \quad (2)$$

За відсутності електромагнітної інерції ( $T_1=0$ )

$$M = -\beta\omega_1 \quad (3)$$

За відсутності електромагнітної інерції двигун створює момент, що впливає на першу масу, аналогічний моменту в'язкого тертя.

Отже, електропривод завдяки наявності електромеханічного зв'язку чинить на коливання в механічній частині демпфувальну дію, аналогічну дії в'язкого тертя. Ступінь загасання коливань у консервативній механічній системі є кількісним показником демпфувальної здатності електропривода [15].

Передчасний вихід з ладу компонентів кранів і підкранових конструкцій зумовлений надмірно високими динамічними навантаженнями, особливо під час запуску, реверсу і гальмування. Це призводить до інтенсивного зношування проміжних валів, редукторів, муфт, металоконструкцій мостів, реборд ходових ко-

ліс, підкранових конструкцій і електродвигунів [16].

Основними чинниками, що впливають на величину динамічних навантажень, є: а) недосконалість системи керування електроприводами; б) наявність пружних елементів; в) зазори в кінематичних ланцюгах, зокрема в редукторах і між ребордами коліс та рейками; г) перекіс ферми моста.

Найефективніший спосіб зниження динамічних навантажень, а також підвищення довговічності механізмів пересування кранів і підкранових конструкцій полягає у модернізації існуючих електроприводів і впровадженні нових, які знижують різницю швидкостей обертання роторів двигунів. Система управління електроприводами пересування моста повинна бути адаптивною, з автоматичним підтриманням параметрів регульованих елементів на рівні, що мінімізує перекіс крана. У механічній частині необхідно знизити кутові зазори, замінивши наявні приводні вали на стандартні карданні. Використання демпфуючих властивостей електроприводів у поєднанні з підвищенням плавності навантаження механічної частини дозволяє формувати перехідні процеси без значних механічних коливань [17].

Урахування пружних зв'язків є критично важливим для стабільності, надійності, ефективності системи керування електроприводом мостового крана. Алгоритми керування різних сучасних систем керування електроприводом мають можливість враховувати пружні зв'язки, це значно знижує динамічні навантаження, мінімізує коливання, покращує продуктивність системи автоматичного керування.

## V. АДАПТИВНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ

Серед сучасних систем автоматичного керування що враховує пружні зв'язки слід виділити адаптивну систему керування. Адаптивна система керування електроприводом мостового крана необхідна для забезпечення оптимальним функціоналом крана під час роботи в умовах змінних навантажень та зовнішніх впливів. Адаптивна система має здатність автоматичного налаштування параметрів керування в залежності від умов експлуатації, це в свою чергу дозволяє підвищити надійність та ефективність роботи мостового крана [18].

Серед особливостей адаптивної системи керування слід виділити:

- Система використовує датчики та алгоритми програмування, мета яких моніторинг стану крана, в тому числі навантаження, швидкість, температурні режими тощо.

- Під час збору даних система в автоматичному режимі реагує та коригує параметри керування електроприводом з метою забезпечення оптимальної роботи.

- Адаптивна система керування електроприводом враховує пружні зв'язки у механічній системі мостового крана, що дозволяє уникати резонансних

явищ, мінімізує вібрації під час руху крана.

- Система використовує інформацію, що поступає від дискретних давачів положення з метою точного визначення положення вантажу та подальшого налаштування алгоритмів керування відповідно поточному стану.

- Адаптивна система керування електроприводом мостового крана за допомоги оптимального керування електроприводом дозволяє зменшити енергоспоживання, і як наслідок витрати на експлуатацію мостового крана, також підвищується загальна безпека роботи та майже виключаються аварійні ситуації.

Таким чином, адаптивна система керування електроприводом мостового крана представляє собою важливий елемент сучасного мостового крана, який враховує пружні зв'язки, забезпечує економічну, ефективну та безпечну роботу в умовах динамічних навантажень, зовнішніх впливів [19].

Найбільш розповсюдженими з систем керування є системи з одним навантаженням. Для систем, які складаються з двох та більше навантажень, пропонуються традиційні методи керування.

Застосування адаптивної системи керування на основі нейронної мережі Radial basis function (RBF) для системи автоматичного керування електроприводом механізму пересування мостового крана є достатньо новою системою керування.

Новий контролер допомагає збалансувати візок та маятники під час роботи. Вплив невизначеності моделі регулюється адаптивним законом на основі нейронної мережі RBF. Дані системи мостового крана вимірюються за допомоги зворотного зв'язку на виході, це значно знижує витрати під час проектування обладнання [19]. Навчання мережі RBF складається зі збору даних про роботу крана, послідовну обробку цих даних з метою визначення оптимальних параметрів керування та постійне налаштування на основі змінних умов експлуатації. Навчання проходить шляхом зворотного зв'язку за допомоги алгоритмів машинного навчання.

Під час роботи механізму виникають коливання в його металоконструкціях і трансмісійних валах, а також розгойдування вантажу, який разом із канатом утворює маятник з рухомою точкою підвісу. Припустимо, що візок, маятник та вантаж працюють у двовимірній площині, при цьому візок рухається по горизонтальній лінії (рис.5).

Дану модель можна побудувати за допомогою метода Ньютона-Ейлера або Ейлера-Лагранжа.

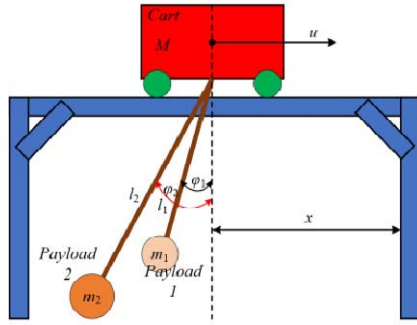


Рисунок 5. Модель простої системи мостового крана

де  $M$  - позначає масу візка;

$m_1$  - маса корисного вантажу 1;

$l_1$  - довжина кабелю між центром візка та вантажем 1;

$\varphi_1$  - кут повороту вантажу 1;

$m_2$  - маса вантажу 2;

$l_2$  - довжина кабелю між центром візка та вантажем 2;

$\varphi_2$  - кут повороту вантажу 2;

$g$  - гравітаційна стала.

Користуючись формулою Ейлера – Лагранжа, яка базується на кінетичній та потенційній енергії, представимо рівняння у вигляді:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial L}{\partial q} + \frac{\partial p}{\partial q} = u, \quad (4)$$

де,  $L$  та  $P$  - це кінетична та потенційна енергія відповідно;  $q$ - узагальнена координата  
 $u$  - рушійна сила візка.

$$q = [x \varphi_1 \varphi_2]^T, \quad (5)$$

де  $x$  - положення візка,  $T$  - кінетична енергія

$\varphi_1$  та  $\varphi_2$  - положення маятника 1 та маятника 2 відповідно відносно вертикальної осі.

Загальна потенційна енергія механічної системи записується як:

$$P = m_1 l_1 g (1 - \cos(\varphi_1(t))) + m_2 l_2 g (1 - \cos(\varphi_2(t))) \quad (6)$$

Загальна кінетична енергія механічної системи має вигляд:

$$\begin{aligned} L &= \frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2 + \frac{1}{2} M \dot{x}^2 \\ &= \frac{1}{2} m_1 ((l_1 \dot{\varphi}_1 \sin \varphi_1)^2 + (\dot{x} - l_1 \dot{\varphi}_1 \cos \varphi_1)^2) \\ &+ \frac{1}{2} m_2 ((l_2 \dot{\varphi}_2 \sin \varphi_2)^2 + (\dot{x} - l_2 \dot{\varphi}_2 \cos \varphi_2)^2) \\ &+ \frac{1}{2} M \dot{x}^2 \end{aligned} \quad (7)$$

де,  $\varphi_1$  - кутова швидкість вантажу 1;

$\varphi_2$  - кутова швидкість вантажу 2;

$v_1$ ,  $v_2$  - компоненти швидкості маятника в напрямках  $x$  і  $y$ , які обчислюються наступним чином:

$$\begin{aligned} v_1^2 &= (\dot{x} - l_1 \dot{\varphi}_1 \cos \varphi_1)^2 + (l_1 \dot{\varphi}_1 \sin \varphi_1)^2 \\ v_2^2 &= (\dot{x} - l_2 \dot{\varphi}_2 \cos \varphi_2)^2 + (l_2 \dot{\varphi}_2 \sin \varphi_2)^2 \end{aligned} \quad (8)$$

Нейронна мережа RBF в останній час достатньо популярна та привертає увагу науковців та дослідників. Завдяки тривірневій структурі, яка включає вхідний та вихідний шар, здатність до узагальнення, уникнення тривалих та непотрібних обчислень в порівнянні з багатошаровими мережами [20].

Даний адаптивний метод керування базується на нейронному наближенні з невідомими параметрами [21].

Визначення вектору помилки:

$$e(t) = \begin{bmatrix} x_1 - x_{ref} \\ x_3 - \varphi_{1ref} \\ x_5 - \varphi_{2ref} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x - x_{ref} \\ \varphi_1 - \varphi_{1ref} \\ \varphi_2 - \varphi_{2ref} \end{bmatrix} = q - q_{ref} \quad (9)$$

де  $q_{ref} = [x_{ref} \varphi_{1ref} \varphi_{2ref}]^T$ ,  $x_{ref}$  є бажаною позицією, а  $\varphi_{1ref}$ ,  $\varphi_{2ref}$  є бажаними кутами повороту.

Закон керування має наступний вигляд:

$$u = \frac{1}{G(x)} [q_{ref} - F(X) + K^T e] \quad (10)$$

Структурна схема замкнутої системи керування представлено на рисунку 6 [22]. Якщо за основу береться відома система, тоді треба вказати чим запропонована у статті відрізняється від вказаної, інакше немає новизни.

Запропонований у статті регулятор забезпечує стабільну роботу для всіх виходів системи, при цьому адаптивність системи гарантовано під час зміни параметрів для відповідності реальним умовам експлуатації мостового крана.

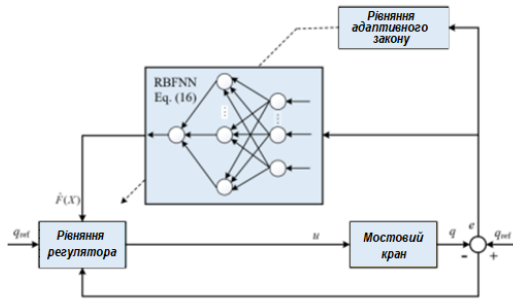


Рисунок 6. Структурна схема замкненої системи керування

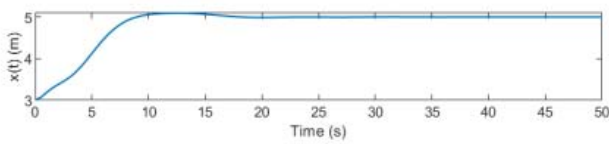


Рисунок 7. Положення візка за сценарієм 1 при  $x = 5$

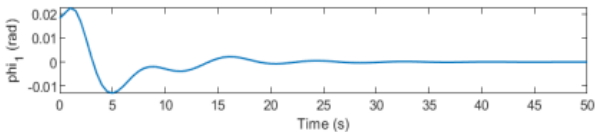


Рисунок 8. Кут повороту вантажу 1 за сценарієм 1

при  $\varphi_1 = \pi/3$

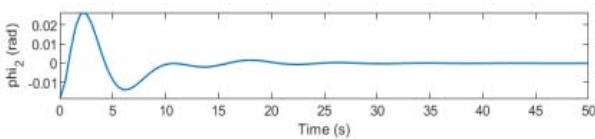


Рисунок 9. Кут повороту вантажу 2 за сценарієм 1

при  $\varphi_2 = -\pi/3$

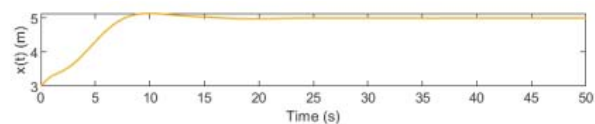


Рисунок 10. Положення візка за сценарієм 2 при  $x = 5$

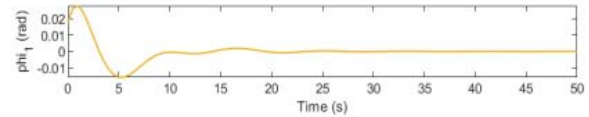


Рисунок 11. Кут повороту вантажу 1 за сценарієм 2

при  $\varphi_1 = \pi/3$

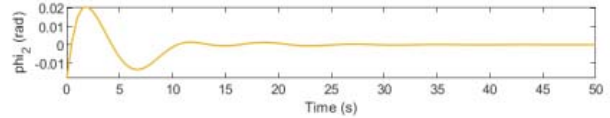


Рисунок 12. Кут повороту вантажу 2 за сценарієм 2

при  $\varphi_2 = -\pi/3$

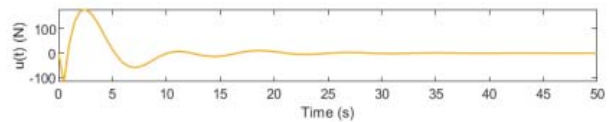


Рисунок 13. Вхідний сигнал керування за сценарієм 2

при  $x = 5$

Сценарій 1: Параметри системи мостових кра-

нів становлять  $M = 1000 (kg)$ ,  $m_1 = 50 (kg)$ ,  $m_2 = 100$

$(kg)$ ,  $l_1 = 10 (m)$ ,  $l_2 = 20 (m)$ .

Сценарій 2: Параметри системи мостових кра-  
 нів становлять  $M = 100 (kg)$ ,  $m_1 = 5 (kg)$ ,  $m_2 = 10$   
 $(kg)$ ,  $l_1 = 1 (m)$ ,  $l_2 = 2 (m)$ .

Результати моделювання на рис. 7-13 показують, що запропонований регулятор стабілізує всі реакції системи мостового крана з високою ефективністю керування. Реакції на положення візка та кута повороту троса завжди відстежують задане значення з малим часом реакції.

На рисунку 6 представлено структурну схему з урахуванням пружних зв'язків між компонентами системи, в даній схемі представлена адаптивна система керування. На рисунку 7 представлено графік,

який демонструє динаміку руху візка при заданих координатах положення ( $x=5$ ). При цьому відстежується траєкторія руху візка, враховано вплив адаптивного регулятора. Графік показує, що система швидко досягає стабільності з мінімальним часом відгуку [23].

Графік на рисунку 8 відображає кут повороту вантажу. За допомогою адаптивного методу керування система швидко стабілізує будь-які коливання вантажу, тим самим підтверджується висока ефективність запропонованої системи. Графік на рисунку 9 показує аналогічні з рисунком 8 результати, тільки за іншим сценарієм, тут коливання достатньо ефективно гасяться адаптивною системою керування. На рисунку 10 представлено результат сценарію, коли система продовжує стабільне відстеження траєкторії візка. Рисунки 11, 12 відображають динаміку кутів повороту вантажів за іншими сценаріями, при цьому система знову зберігає високу стабільність. Графік рисунку 13 демонструє поведінку вхідного керуючого сигналу, що стабільно має регуляційний вплив на позицію візка та вантажу.

Адаптивність регулятора визначається відношенням до зміни параметрів системи мостового крана. Зазвичай обсяг навантаження дуже різноманітний і залежить від кожної окремої умови експлуатації. Змінюючи масу вантажу і довжину кабелю, ми отримуємо реакцію системи як показано на рисунках 11-13 [24].

Результати, отримані з регулятором, що використовує RBF нейронну мережу (перерегулювання 0,217%), показують, що якість системи покращується з точки зору перерегулювання. Крім того, контролери на основі нечіткої логіки мають недолік, оскільки вони залежать від розуміння об'єкта експертом [25].

Запропонований регулятор є стійким для всіх виходів системи: положення візка і кут повороту троса точно відстежують бажані значення, а коливання вантажу повністю демпфуються. Адаптивність системи гарантується при зміні параметрів системи відповідно до реальних умов роботи крана.

## VI. ВИСНОВКИ

В роботі вирішувалось завдання дослідження та розробки адаптивної системи управління електроприводом мостового крана, що враховує пружні зв'язки. Моделювання було проведено для типового мостового крана, в якому використовується асинхронний двигун. При цьому сценарії тестувались за умов різного навантаження з метою оцінки роботи системи в змінних умовах, тим самим дані умови були наближені до реальних експлуатаційних умов.

Запропонована система дозволяє підвищити точність, стабільність роботи крана в умовах змінних динамічних навантажень. Інноваційний підхід керування дозволить покращити надійність системи, оптимізувати роботу мостового крана, знизити аварій-

ність.

Отримані результати моделювання свідчать про достатньо значне підвищення ефективності, стійкості та надійності системи керування мостовим краном завдяки використанню адаптивної системи. Якщо порівнювати з традиційними методами керування, в яких пружні зв'язки викликають коливання, нестабільність роботи, дана система достатньо ефективно стабілізує рух крана. На основі відомих методів розроблено математичну модель та структуру керування, яка враховує пружні зв'язки. Розглянута адаптивна система керування електроприводом мостового крана має перевагу серед інших існуючих систем завдяки надійності, безпеці, ефективності та оптимальності, оскільки може автоматично налаштувати параметри керування (динамічні навантаження, пружні зв'язки) в залежності від умов експлуатації, що дозволить підвищити надійність та ефективність роботи мостового крана.

Подальші дослідження слід зосередити на впровадженні інноваційних систем керування в умовах промисловості та врахуванні впливу різних зовнішніх факторів, таких, як механічні та вітрові навантаження, вібрації, температура, вологість тощо. Для забезпечення стійкості та ефективності системи керування врахування цих факторів критично важливе, оскільки має суттєвий вплив на надійність, точність та довговічність роботи електроприводу.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Видмиш А. А., Ярошенко Л.В. Основи електропривода. Теорія та практика. Частина 1. / Навчальний посібник. Вінниця: ВНАУ, 2020. 387 с.
- [2] Збітнєв П.В., Будіков Л.Ю., Асєєв А.М. Про формування процесів гальмування мостових кранів. Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля, 2013. №6 (195), ч. 2. С. 110-115.
- [3] Ловейкін В.С., Ромасевич Ю.О. Динамічна оптимізація режиму руху кранового механізму переміщення. Підйомно-транспортна техніка, 2013. №3. С. 5-21.
- [4] Abdel-Rahman E. M., Nayfeh A. H., Masoud Z. N. Dynamics and control of cranes: A review. Journal of Vibration and Control, 2003. № 9(7). P. 863-908.
- [5] Zhao, X., & Huang, J. Distributed-mass payload dynamics and control of dual cranes undergoing planar motions. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019. 126. P. 636-648.  
URL: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2019.02.032>
- [6] Sun, Z., Bi, Y., Zhao, X., Sun, Z., Ying, C., Tan, S. Type-2 fuzzy sliding mode anti-swing controller design and optimization for overhead crane, 2018.  
URL: <https://doi.org/10.1109/access.2018.2869217>
- [7] Wang, T., Tan, N., Zhang, X., et al. A time-varying sliding mode control method for distributed-mass double pendulum bridge crane with variable



- parameters, 2021.  
URL: <https://doi.org/10.1109/access.2021.3079303>
- [8] Fihakhir, A. M., & Guerbouz, A. Intelligent control of industrial gantry crane model "3D Crane". International Journal of Emerging Trends in Engineering Research (IJETER), 2022. 10(10). URL: <https://doi.org/10.30534/ijeter/2022/0310102022>
- [9] Wahyudi, Jalani, J., Muhida, R., & Salami, M. J. E. Control Strategy for Automatic Gantry Crane Systems: A Practical and Intelligent Approach. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2007. 4(4). URL: [https://www.academia.edu/8900563/Control\\_Strategy\\_for\\_Automatic\\_Gantry\\_Crane\\_Systems\\_A\\_Practical\\_and\\_Intelligent\\_Approach](https://www.academia.edu/8900563/Control_Strategy_for_Automatic_Gantry_Crane_Systems_A_Practical_and_Intelligent_Approach)
- [10] Abdullahi, A. M., Mohamed, Z., Selamat, H., Pota, H. R., Zainal Abidin, M. S., Ismail, F. S., & Haruna, A. Adaptive output-based command shaping for sway control of a 3D overhead crane with payload hoisting and wind disturbance, 2018. URL: <https://doi.org/10.30534/ijeter/2022/0310102022>
- [11] Hmoumen, M., & Szabo, T. Controlling of payload swinging of an overhead crane. Robert Bosch Department of Mechatronics, Faculty of Mechanical Engineering and Informatics, University of Miskolc, Egyetemvaros, H-3515, Miskolc, Hungary. Published online December 13, 2021.
- [12] Carlos, W., Leite, F., Costa, G.A., Castro, I.L., Franklin, E., Ferreira, M., Moura, J.P., Viana, J., & Neto, D.F. Event Discrete Control Strategy Design of Overhead Crane embedded in Programmable Logic Controller, 2018. URL: [https://www.academia.edu/35670386/Event\\_Discrete\\_Control\\_Strategy\\_Design\\_of\\_Overhead\\_Crane\\_embedded\\_in\\_Programmable\\_Controller?uc-gsw=11138701](https://www.academia.edu/35670386/Event_Discrete_Control_Strategy_Design_of_Overhead_Crane_embedded_in_Programmable_Controller?uc-gsw=11138701)
- [13] Ключем В.І. Теорія електроприводу: Навчальний посібник для ВНЗ, - 2-е вид. перероб. і доп. Енергоатоміздат, 2001. 704 с
- [14] Слепужніков Є.Д., Фідровська Н.М., Варченко І.С. Механізми пересування мостових кранів: монографія. Харків: НУЦЗУ, 2019. 124 с.
- [15] Воляннюк В.О. Підйомно-транспортні машини (системи): конспект лекцій Ч. 1. Київ. КНУБА, 2019. 144 с.
- [16] Тимошенко, Б. О., Філатов, С. Ю., Клімченков, А. Г., Івченков, М. В. Шляхи вдосконалення електромеханічної системи (ЕМС) мостового крану на підставі підвищення ступеню автоматизації Науковий вісник ДГМА, 2016. № 3 (21Е). С. 38. ISSN 2219-7869.
- [17] Alghanim, K. A., Alhazza, K. A., Masoud, Z. N. Discrete-time command profile for simultaneous travel and hoist maneuvers of overhead cranes. Journal of Sound and Vibration, 345, 2015. P. 47-57. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2015.01.042>
- [18] Anh, L. V., & Linh, V. T. T. Position Control and Anti-Sway of Overhead Crane System with Uncertain Nonlinear Model. Faculty of Electrical Engineering, University of Economics – Technology for Industries, Ha Noi 100000, Vietnam, 2023.
- [19] Chen, H., Fang, Y., Sun, N. A swing constraint guaranteed MPC algorithm for underactuated overhead cranes. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2016. 21(5). P. 2543-2555. URL: <https://doi.org/10.1109/tmech.2016.2558202>
- [20] Finch, J.W.; Giaouris, D. Controlled AC Electrical Drives. IEEE Trans. Ind. Electron. 2008, 55, P. 481–491. URL: <https://doi.org/10.1556/606.2021.00474>
- [21] Leite, D., Aguiar, C., Pereira, D., Souza, G., Škrjanc, I. Nonlinear fuzzy state-space modeling and LMI fuzzy control of overhead cranes. In 2019 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE), New Orleans, LA, USA, 2019. P. 1-6. URL: <https://doi.org/10.1109/FUZZ-IEEE.2019.8858968>
- [22] Pimkumwong, N.; Wang, M.-S. Online Speed Estimation Using Artificial Neural Network for Speed Sensorless Direct Torque Control of Induction Motor based on Constant V/F Control Technique. Energies, 2018. 11, 2176.
- [23] Urbas, A., Augustynek, K., & Stadnicki, J. Dynamics analysis of a crane with consideration of a load geometry and a rope sling system. Journal of Sound and Vibration, 2024. 572, 118133. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2023.118133>
- [24] Wu, X., Xu, K., Lei, M., He, X. Disturbance-compensation-based continuous sliding mode control for overhead cranes with disturbances. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2020. 17(4). P. 2182-2189. URL: <https://doi.org/10.1109/tase.2020.3015870>
- [25] Yang, C., Du, C., Liao, L. Design and implementation of finite time sliding mode controller for fuzzy overhead crane system. ISA Transactions, 2022. 124. P. 374-385. URL: <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2019.11.037>

*Стаття надійшла до редакції 20.08.2024*

## AUTOMATIC CONTROL SYSTEM FOR THE ELECTRIC DRIVE OF AN OVERHEAD CRANE CONSIDERING ELASTIC CONNECTIONS

OLIEINIKOV M. PhD student, Electric drive and automation of industrial equipment department of the

Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: olieinikov.m@gmail.com. ORCID: 0000-0001-5999-5733;

**Purpose.** Investigation of the peculiarities of the automatic control system of an overhead crane electric drive with regard to elastic connections..

**Research methods.** To achieve this goal, we used the methods of system analysis and modeling with the help of software tools. This made it possible to reflect accurately the processes occurring in the system, as well as to test various operating scenarios and their impact on the overall system efficiency.

**Results.** The study considered the automatic control system of the electric drive and the importance of taking into account elastic connections. The proposed adaptive system uses the RBF neural network. The use of the proposed controller ensures resistance to disturbing influences and allows to level the load oscillations. The adaptability of the system is ensured by changing the parameters (load, speed of movement of mechanisms, stiffness, positioning accuracy, etc.) to meet the operating conditions of the overhead crane. Thanks to this, the system is able to operate efficiently even under variable loads and external influences. Computer modeling of the proposed control system was carried out, which confirmed its effectiveness under various operating conditions.

**Scientific novelty.** This system provides damping of load oscillations and increases the crane positioning accuracy. This is achieved by comparing it with existing control methods according to various criteria. It is proposed to use an algorithm for adapting the parameters of the control system in real time (load, trolley speed, cable length, mechanism stiffness, etc.), which significantly improves (by 5-7% positioning accuracy, by 8-10% stability) the performance of the system. In addition, the study confirmed the ability of the system to adapt to different operating conditions (changed load, variations in travel speed, uneven external disturbances), ensuring the stability and reliability of its operation, which is especially important for ensuring continuous operation of the crane in industrial environments.

**Practical value.** The use of this system can increase the overhead crane productivity by 5-10% compared to traditional control systems. Implementing the system in an industrial environment will significantly improve the efficiency and safety of the crane, as well as reduce maintenance and repair costs. In addition, this system can be used to modernize existing cranes, which will extend their service life and improve their reliability. This opens up new opportunities to improve the efficiency of industrial processes associated with the use of overhead cranes and provides better working conditions for operators.

**Keywords:** crane mechanisms, overhead crane, electric drive, automatic control system, adaptive system, elastic connections.

## REFERENCES

- [1] Vydymysh A. A., Yaroshenko L.V. Fundamentals of Electric Drives. Theory and Practice. Part 1. / Textbook. Vinnytsia: VNAU, 2020. 387 p.
- [2] Zbitniev P.V., Budikov L.Yu., Aseev A.M. On the formation of braking processes in bridge cranes. Bulletin of the East Ukrainian National University named after V. Dahl, 2013. №6 (195), part 2. P. 110-115.
- [3] Loveykin V.S., Romasevich Yu.O. Dynamic optimization of the motion regime of the crane transfer mechanism. Lifting and Transport Equipment, 2013. №3. P. 5-21.
- [4] Abdel-Rahman E. M., Nayfeh A. H., Masoud Z. N. Dynamics and control of cranes: A review. Journal of Vibration and Control, 2003. № 9(7). P. 863-908.
- [5] Zhao, X., & Huang, J. Distributed-mass payload dynamics and control of dual cranes undergoing planar motions. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019. 126. P. 636-648. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2019.02.032>
- [6] Sun, Z., Bi, Y., Zhao, X., Sun, Z., Ying, C., Tan, S. Type-2 fuzzy sliding mode anti-swing controller design and optimization for overhead crane, 2018. URL: <https://doi.org/10.1109/access.2018.2869217>
- [7] Wang, T., Tan, N., Zhang, X., et al. A time-varying sliding mode control method for distributed-mass double pendulum bridge crane with variable parameters, 2021. URL: <https://doi.org/10.1109/access.2021.3079303>
- [8] Fihakhir, A. M., & Guerbouz, A. Intelligent control of industrial gantry crane model "3D Crane". International Journal of Emerging Trends in Engineering Research (IJETER), 2022. 10(10). URL: <https://doi.org/10.30534/ijeter/2022/0310102022>
- [9] Wahyudi, Jalani, J., Muhida, R., & Salami, M. J. E. Control Strategy for Automatic Gantry Crane Systems: A Practical and Intelligent Approach. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2007. 4(4). URL: [https://www.academia.edu/8900563/Control\\_Strategy\\_for\\_Automatic\\_Gantry\\_Crane\\_Systems\\_A\\_Practical\\_and\\_Intelligent\\_Approach](https://www.academia.edu/8900563/Control_Strategy_for_Automatic_Gantry_Crane_Systems_A_Practical_and_Intelligent_Approach)

- [10] Abdullahi, A. M., Mohamed, Z., Selamat, H., Pota, H. R., Zainal Abidin, M. S., Ismail, F. S., & Haruna, A. Adaptive output-based command shaping for sway control of a 3D overhead crane with payload hoisting and wind disturbance, 2018. URL: <https://doi.org/10.30534/ijeter/2022/0310102022>
- [11] Hmoumen, M., & Szabo, T. Controlling of payload swinging of an overhead crane. Robert Bosch Department of Mechatronics, Faculty of Mechanical Engineering and Informatics, University of Miskolc, Egyetemvaros, H-3515, Miskolc, Hungary. Published online December 13, 2021.
- [12] Carlos, W., Leite, F., Costa, G.A., Castro, I.L., Franklin, E., Ferreira, M., Moura, J.P., Viana, J., & Neto, D.F. Event Discrete Control Strategy Design of Overhead Crane embedded in Programmable Logic Controller, 2018. URL: [https://www.academia.edu/35670386/Event\\_Discrete\\_Control\\_Strategy\\_Design\\_of\\_Overhead\\_Crane\\_embedded\\_in\\_Programmable\\_Controller?uc-g-sw=11138701](https://www.academia.edu/35670386/Event_Discrete_Control_Strategy_Design_of_Overhead_Crane_embedded_in_Programmable_Controller?uc-g-sw=11138701)
- [13] Klyuchem V.I. Theory of Electric Drives: Textbook for Universities, - 2nd ed., revised and supplemented. Energoatomizdat, 2001. 704 p.
- [14] Slepuzhnikov Ye.D., Fidrovskaya N.M., Varchenko I.S. Mechanisms for moving bridge cranes: monograph. Kharkiv: NUTZU, 2019. 124 p.
- [15] Volyanyuk V.O. Lifting and Transport Machines (Systems): Lecture Notes Part 1. Kyiv: KNUCA, 2019. 144 p.
- [16] Timoshenko, B. O., Filatov, S. Yu., Klimchenkov, A. G., Ivchenkov, M. V. Ways to improve the electromechanical system (EMS) of a bridge crane based on increasing the degree of automation. Scientific Bulletin of DGMA, 2016. № 3 (21E). P. 38. ISSN 2219-7869.
- [17] Alghanim, K. A., Alhazza, K. A., Masoud, Z. N. Discrete-time command profile for simultaneous travel and hoist maneuvers of overhead cranes. Journal of Sound and Vibration, 345, 2015. P. 47-57. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2015.01.042>
- [18] Anh, L. V., & Linh, V. T. T. Position Control and Anti-Sway of Overhead Crane System with Uncertain Nonlinear Model. Faculty of Electrical Engineering, University of Economics – Technology for Industries, Ha Noi 100000, Vietnam, 2023.
- [19] Chen, H., Fang, Y., Sun, N. A swing constraint guaranteed MPC algorithm for underactuated overhead cranes. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2016. 21(5). P. 2543-2555. URL: <https://doi.org/10.1109/tmech.2016.2558202>
- [20] Finch, J.W.; Giaouris, D. Controlled AC Electrical Drives. IEEE Trans. Ind. Electron. 2008, 55, P. 481–491. URL: <https://doi.org/10.1556/606.2021.00474>
- [21] Leite, D., Aguiar, C., Pereira, D., Souza, G., Škrjanc, I. Nonlinear fuzzy state-space modeling and LMI fuzzy control of overhead cranes. In 2019 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE), New Orleans, LA, USA, 2019. P. 1-6. URL: <https://doi.org/10.1109/FUZZ-IEEE.2019.8858968>
- [22] Pimkumwong, N.; Wang, M.-S. Online Speed Estimation Using Artificial Neural Network for Speed Sensorless Direct Torque Control of Induction Motor based on Constant V/F Control Technique. Energies, 2018. 11, 2176.
- [23] Urbas, A., Augustynek, K., & Stadnicki, J. Dynamics analysis of a crane with consideration of a load geometry and a rope sling system. Journal of Sound and Vibration, 2024. 572, 118133. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2023.118133>
- [24] Wu, X., Xu, K., Lei, M., He, X. Disturbance-compensation-based continuous sliding mode control for overhead cranes with disturbances. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2020. 17(4). P. 2182-2189. URL: <https://doi.org/10.1109/tase.2020.3015870>
- [25] Yang, C., Du, C., Liao, L. Design and implementation of finite time sliding mode controller for fuzzy over-head crane system. ISA Transactions, 2022. 124. P. 374-385. URL: <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2019.11.037>

УДК 621.316

## ВИЗНАЧЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ НАПРУГИ У ПРОМИСЛОВИХ СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПРИ ОБМЕЖЕНІЙ ПОТУЖНОСТІ ЕНЕРГОСИСТЕМИ

- ПАПАЙКА Ю.А. д-р. техн. наук, професор, завідувач кафедри електроенергетики Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна, e-mail: paraika.yu.a@nmu.one, ORCID: 0000-0001-6953-1705;
- ЛИСЕНКО О.Г. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електропривода Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна, e-mail: lysenko.o.g@nmu.one, ORCID: 0000-0002-7041-671X;
- МАЛИШКО М.М. аспірант кафедри електроенергетики Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна, e-mail: malyshko.m.m@nmu.one, ORCID: 0009-0000-0413-053X;
- УДОВИК О.В. аспірант кафедри електроенергетики Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна, e-mail: udovyk.o.v@nmu.one, ORCID: 0009-0002-1000-7815.

**Мета роботи.** Обґрунтувати залежності визначення показників електромагнітної сумісності систем електропостачання промислових підприємств при наявності потужних нелінійних та несиметричних навантажень в умовах обмеженої потужності енергосистеми.

**Методи дослідження.** Методи теоретичної електротехніки для побудови схем заміщення трифазних електричних мереж, ряди Фур'є для аналізу вищих гармонік струму та напруги, метод симетричних складових для аналізу несиметрії.

**Отримані результати.** Виділено основні показники якості напруги, значення яких залежить від параметрів живлячої електроенергетичної системи (потужності короткого замикання). Наведено аналітичні залежності розрахунку показників несиметрії та несинусоїдальності при обмеженні потужності КЗ. Проаналізовано засоби корекції показників якості в умовах електричних мереж з розподіленою генерацією.

**Наукова новизна.** Наукова новизна полягає у встановленні закономірностей зміни режимних параметрів промислового навантаження від параметрів енергосистеми, що виражається у взаємопов'язаних змінах показників якості напруги. При цьому в аналітичних моделях додана опція отримання варіативних змін параметрів енергосистеми як за рахунок генеруючих потужностей, так і через параметри схем заміщення електричних мереж різного класу напруги.

**Практична цінність.** Для інженерних розрахунків запропоновано спрощені алгоритми визначення показників якості напруги (відхилення, коливання, несиметрії та несинусоїдальності напруги) з урахуванням реальної конфігурації електричної мережі та актуальної потужності енергосистеми. Це дає можливість оцінити ефективність передачі та перетворення електроенергії за довільної конфігурації схеми післяаварійного живлення.

**Ключові слова:** якість напруги; вищі гармоніки; несиметрія напруги, коливання напруги.

### I. ВСТУП

Енергетика України сьогодні працює в умовах надскладних викликів, пов'язаних з військовою агресією росії та руйнації значної частки енергогенеруючих потужностей та системоутворюючих підстанцій. Основні вимоги, що висувуються до української енергосистеми Урядом – технічні й експлуатаційні обмеження генерації, надійність та якість електропостачання об'єктів критичної інфраструктури, максимальне впровадження відновлюваних джерел енергії, розвиток децентралізованих систем генерації електричної та теплової енергії для промисловості та муніципалітетів. Ринок електроенергії України зараз працює

у надскладних реаліях з необхідністю прогнозування електроспоживання, системою почергових вимикань електроенергії та визначення пріоритетів підтримки військово-промислового комплексу для забезпечення обороноздатності та економічної безпеки [1] - [2]. Зв'язок з європейською системою ENTSO-E дозволяє Об'єднаній енергетичній системі забезпечити стійкість режиму та надійності електропостачання [3].

Реальна ситуація сьогодення української електроенергетики визначається надвисоким рівнем втрат електроенергії при передачі (до 20 %), пов'язаних з переходом до схем аварійного транзиту та перетворення електроенергії. У світовій історії це перший унікальний випадок, коли потужна індустріально-

розвинена країна проходить воєнний період своєї історії з щоденними атаками на енергетичні об'єкти та успішно протистоїть технічним, економічним та екологічним загрозам. Високий рівень втрат в електричних мережах України пов'язаний з недостатнім рівнем компенсації реактивної потужності, застарілими основними фондами об'єктів електроенергетики, недостатнім використанням засобів оптимізації режимів роботи і регулювання напруги, невирішеністю проблем якості електричної енергії, особливо в умовах обмеженої потужності енергосистеми [4]. Низький рівень якості електричної енергії призводить до значного зниження енергетичної ефективності електричних мереж за цілою низкою показників (відхилення, несиметрія, несинусоїдальність напруги). Проблема якості електричної енергії – це складова комплексного поняття електромагнітної сумісності системи електропостачання (СЕС). При роботі «ослабленої» енергосистеми або масового впровадження децентралізованого принципу побудови електричних мереж, проблема якості електроенергії набуває свого визначального значення [1] - [8].

Визначаючи стратегічне значення для енергетичної безпеки й обороноздатності України промислових підприємств різних форм власності, необхідно підкреслити актуальність виконання комплексних досліджень з енергетичної ефективності та якості електропостачання підприємств, зважаючи на нестаціонарні умови споживання електроенергії, обмеженого значення потужності короткого замикання та режимних особливостей потужних промислових електроустановок [4].

## II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Наукові дослідження у галузі електромагнітної сумісності та якості електроенергії проводились відомими українськими та світовими вченими протягом багатьох років [5]-[6]. Спільні дослідження науковців НТУ «Дніпровська політехніка» та Приазовського технічного університету (м. Маріуполь, Україна) дозволили розвинути наукові основи електромагнітної сумісності та визначити особливості формування енергоефективних режимів потужних промислових навантажень гірничо-металургійного комплексу України. Науково доведені залежності розповсюдження електромагнітних завад нелінійного та несиметричного характеру в електричних мережах від дугових сталеплавильних печей, прокатних станів, вентильних перетворювачів та зварювальних установок [2]. Враховуючи особливості побудови систем електропостачання гірничих та металургійних підприємств, були запропоновані організаційні та технічні засоби нормалізації показників якості напруги. Ефективність таких заходів була доведена в умовах діючих підприємств [8].

Роботи Інституту Електродинаміки НАН України дозволили систематизувати нормативно-правову базу регулювання якості електричної енергії в систе-

мах електропостачання з урахуванням європейського підходу, що набуло надзвичайно важливого значення при переході на синхронну роботу з ENTSO-E [9]. На основі досліджень був впроваджений стандарт ДСТУ EN 50160:2023 [10], який встановлює терміни та значення для основних характеристик напруги в точках приєднання користувачів до електричних мереж змінного струму низької, середньої та високої напруги загальної призначеності в нормальних умовах експлуатування. Цей стандарт установлює норми або значення, у межах яких можна знайти очікувані характеристики напруги на будь-якому терміналі живлення електричних мереж загальної призначеності, але не визначає типову ситуацію, яку зазвичай спостерігає окремий користувач мережею електропостачання [12]. Однак, розроблені стандарти не враховують специфічні особливості технологій та не дають відповіді, як забезпечити нормальне співіснування електроприймачів з «проблемним» характером електричних навантажень та ослабленою електричною мережею в єдиному електромагнітному середовищі.

Науковці Харківського політехнічного інституту запропонували унікальні інструменти дослідження та діагностики повітряних ліній електропередач та підстанцій за допомогою акустичного сканування трас ЛЕП та ошинок підстанцій [11]. Наукові дослідження в області якості електроенергії проводились у напрямку визначення зони відповідальності споживача та постачальника у випадках, коли джерело електромагнітних збурень знаходиться за межами вузла розподілу балансової приналежності [13] - [14].

Таким чином, сучасний рівень досліджень різними науковими школами України відповідає викликам, які сформувались протягом останнього десятиліття щодо нормативно-правового регулювання якості напруги та стрімкому розвитку вентильних перетворювачів у технологіях різних промислових виробництв. У той же час невирішеним виявилась проблема електромагнітної сумісності потужних промислових стаціонарних та мобільних електроустановок при живленні їх від енергосистеми обмеженої потужності або джерела автономного електропостачання. Актуальність досліджень полягає у необхідності розробки методів та алгоритмів нормалізації показників якості напруги в енергосистемах обмеженої потужності з оптимізацією пускових перехідних процесів.

## III. МЕТА РОБОТИ

Метою даної роботи є систематизація досліджень показників якості напруги (відхилення, коливання, несиметрія та несинусоїдальність) у системах електропостачання (СЕС) промислових підприємств та визначення залежностей, які враховують системні обмеження генерації потужності. Для досягнення мети необхідно проаналізувати схеми заміщення та ввести у розрахунки змінні коефіцієнти, що враховують точку приєднання нелінійного або несиметричного

споживача у системі електропостачання.

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

Нормалізація показників якості напруги (ПЯН) до значень стандарту ДСТУ EN 50160:2023 – одна з головних проблем електромагнітної сумісності. Система ПЯН формує кількісні характеристики повільних (відхилень) та швидких (коливань) змін діючого значення напруги, симетрії, частотного складу. Діючий в Україні розроблений Європейський комітет нормалізації в області електротехніки (CENELEK) [7]. Критичний аналіз основним підходам розрахунку та оцінки ПКЯ дозволяє визначити додаткові можливості покращення якості напруги.

*Відхилення напруги.* Головною причиною виникнення відхилень (змін) напруги в СЕП є зміна навантажень, що виникає при:

- змінах режиму роботи споживачів;
- додатковою потужністю споживачів, що приєднуються;
- оперативними перемиканнями;
- аварійними перехідними процесами.

Значення відхилення напруги у будь-якій точці мережі є функцією багатьох змінних:

$$\delta U_t = f(U_s^1, P, Q, Z, Y, \sum \delta U^d), \quad (1)$$

де  $P$  з  $Q$  – активна і реактивна потужність ділянки електричної мережі;  $U_s^1$  – напруга мережі живлення (наприклад, на шинах підстанції);  $Z$  і  $Y$  – опір і провідність елементів електричної мережі;  $\sum \delta U^d$  – сума «добавок», тобто додаткових значень напруги (РПН, ПБВ, локальні регулятори тощо).

*Несиметричні режими напруги мережі живлення* можуть бути викликані несиметрією як джерела, так і споживачів електроенергії. У даному дослідженні розглядається складова несиметрії, викликана нерівномірним розподілом навантаження по фазах, та вводимо припущення, що напруга джерела живлення симетрична по фазам.

Несиметрія напруг у розподільчій мережі промислового підприємства пов'язана зі зростанням числа і потужності несиметричних навантажень - це такі приймачі симетричне виконання яких або неможливо або невиправдано з техніко-економічних міркувань. До таких установок відносяться зварювальні агрегати, дугові та індукційні печі, деякі типи печей опору, освітлення. Підключення таких навантажень до трифазної мережі обмеженої потужності обумовлює появу як тривалих так і короткочасних несиметричних режимів струмів і напруг.

Несиметрія напруг негативно впливає на роботу всіх елементів системи електропостачання, знижує термін служби ізоляції, призводить до збільшення

втрат потужності, перегріву обмоток машин, що обертаються, знижує надійність основного і допоміжного електрообладнання [6].

Для зниження несиметрії було розроблено велику кількість спеціальних симетруючих пристроїв. Необхідно відзначити, що в загальному випадку симетрування несиметричних режимів можна здійснювати як за допомогою реактивних, так і активних елементів, проте всі існуючі симетруючі пристрої виконані на реактивних елементах, оскільки в них відсутні додаткові втрати активної потужності. З економічних міркувань застосування симетруючих пристроїв на активних елементах доцільно лише тоді, коли корекція несиметричних режимів здійснюється за допомогою самих навантажувальних елементів.

Процес коливання струмів в окремих фазах мережі 380 В промислового підприємства обумовлений особливостями режимів цехових електроприймачів і має випадковий характер. Зміна коефіцієнтів несиметрії у часі також відбувається випадковим чином, тому прогнозувати значення показників несиметрії при зниженні потужності енергосистеми можна лише наближено з похибкою, прийнятною для інженерних розрахунків.

Несиметрія напруги має максимальні значення в точці приєднання несиметричного навантаження. Отже, віддаляючи «чутливі» приймачі від точки підключення несиметричного навантаження, можна знизити їх затискачі рівень несиметрії напруг. Цього можна досягти зміною схеми електропостачання. Наприклад, в електричній мережі можна використовувати роздільне підключення несиметричного та симетричного навантаження за допомогою трансформатора або реактора з розщепленими обмотками. Можна також використовувати індивідуальне живлення несиметричного навантаження від енергосистеми. Дані методи іноді використовуються при проектуванні систем електропостачання та подібний підхід добре себе зарекомендував при розробці децентралізованих електричних систем з автономними джерелами живлення (дизель-генераторні установки, сонячні електростанції, установки когенерації).

Можливість симетрування напруги шляхом збільшення потужності КЗ підтверджується відомою формулою наближеної оцінки несиметрії напруги у трифазній системі у вигляді відношення потужності несиметричного навантаження до потужності короткого замикання в місці її підключення, % [4]:

$$K_U \approx \frac{S_{ном1\phi}}{S_{КЗ}}, \quad (2)$$

де  $S_{ном1\phi}$  – потужність еквівалентного однофазного навантаження;  $S_{КЗ}$  – потужність КЗ в точці приєднання однофазного навантаження.



віддалених від джерела живлення мережах 0,4 та 6 кВ.

Коливання напруги негативно позначаються на зоровому сприйнятті предметів, деталей, графічних зображень і, зрештою, на продуктивність праці та зір працівників [15].

Фізіологічну основу сприйняття зорового образу становить, як відомо, робота зорового аналізатора, однією з основних частин якого є рецептор. Його основна функція полягає у перетворенні енергії діючого подразника на нервовий процес. Подразником зорового аналізатора служить світлова енергія. А оскільки процеси, що відбуваються в зоровому аналізаторі, як і всі процеси в природі біологічної системи, наприклад процес зорового сприйняття, мають енергетичний зміст, то зоровий аналізатор має певні енергетичні характеристики.

За наявності вищих гармонік (ВГ) у СЕП з'являються додаткові втрати в електричних обертових машинах, трансформаторах, повітряних та кабельних ЛЕП, утруднюється або стає неможливою компенсація реактивної потужності за допомогою конденсаторних установок, скорочується термін служби ізоляції електричних машин та апаратів, погіршується робота пристроїв захисту, автоматики, телемеханіки та зв'язку, виникають похибки у роботі лічильників [16].

Оцінка коливань та несинусоїдальності напруги спрощеними інженерними методами широко використовується в умовах діючих підприємств та сьогодні має надзвичайно актуальне значення для забезпечення енергоефективного та надійного електропостачання. Система електропостачання промислового підприємства є складною й динамічною, постійні часу основних елементів якої досить високі, тому вони можуть розглядатися як елементи, параметри яких в частотному спектрі огинаючої напруги (0,1-15 Гц) практично незмінні й їх можна вважати лінійними [8]. При складанні схем заміщення силових елементів (трансформаторів, реакторів, більшості навантажень) модуль передаточної функції може бути представлений коефіцієнтом передачі із загальним виразом [8]:

$$K = \frac{x_c}{x_c + x_e}, \tag{3}$$

де  $x_c$  – індуктивний опір СЕП до точки розрахунку;  $x_e$  – індуктивний опір силового елемента. Опори можуть розраховуватися за схемою заміщення СЕП, складеною для розрахунку струмів КЗ. Залежно від розрахункових величин може бути визначене значення сумарного коефіцієнта гармонійних спотворень  $K_{THDU}$  при розрахунках несинусоїдальних режимів,  $\delta U_t$  при розрахунку коливання або дози флікера

$P_{st}$  або  $P_{lt}$ . Похибка розрахунку  $\delta U_t$  і  $K_{THDU}$  у вузлах СЕП не перевищує 3 %; для  $P_{st}$  і  $P_{lt}$  виявляється дещо більшою (до 4-5 %).

На рис. 4 і рис. 5 представлені схеми електропостачання промислового підприємства різних варіантів і їх схеми заміщення.

У табл. 1 і табл. 2 представлені значення коефіцієнтів передачі  $K$  для типових двообмоткових трансформаторів типу ТРДН з  $U_{ном}=150$  кВ та зі здвоєними реакторами. В усіх випадках вихідною точкою (вузлом) розрахунку за таблицями є значення нелінійного навантаження на шинах джерела несинусоїдальності або коливань напруги.

Сумарний коефіцієнт гармонійних спотворень за напругою на шинах приєднання перетворювачів частоти визначається за залежністю:

$$K_{THDU}^{(ВП)} = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{40} U_{(n)i}^2}}{U_{ном}}, \tag{4}$$

де  $U_{(n)i}$  – напруга і-ої вищої гармоніки. Згідно ДСТУ EN50160:2023, враховується спектр до сорокової вищої гармоніки.

У таблицях наведені значення коефіцієнтів передачі (в.о.)  $K_{ВП-СП}$  і  $K_{ВП-ВН}$  для двообмоткових трансформаторів (ТРДН)  $U_{ВН}=150$  кВ і  $K_{ВП-СТ}$ ,  $K_{ВП-ВН}$ , і  $K_{ВП-НН2}$  при використанні здвоєних реакторів з  $U_{ном} = 6 - 10$  кВ .

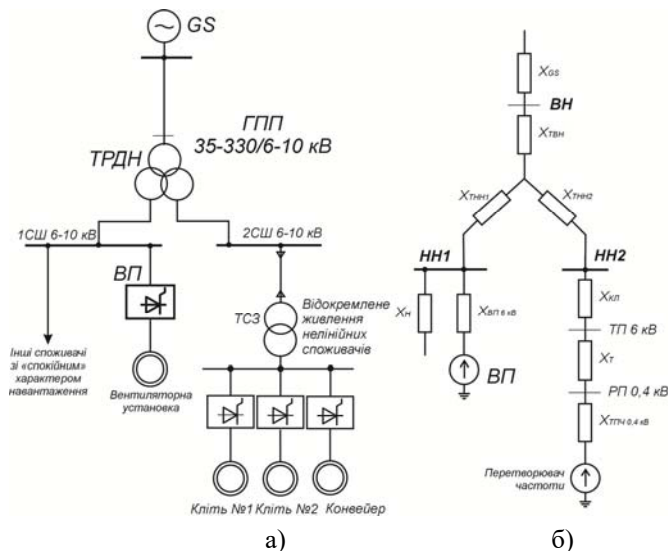


Рисунок 4. Схема електропостачання підприємства з двообмотковим трансформатором (а) та розрахункова схема заміщення (б)



**Таблиця 1.** Значення коефіцієнтів передачі для типових трансформаторів з розщепленими обмотками з  $U_{BH} = 150$  кВ

$S_{ном},$ МВА	$S_{КЗ},$ МВА	Коефіцієнти передачі	
		$K_{ВП-СП}$	$K_{ВП-ВН}$
25	1000	0,145	0,564
	2000	0,122	0,488
	3000	0,104	0,386
	4000	0,095	0,323
40	1000	0,178	0,712
	2000	0,153	0,604
	3000	0,125	0,502
	4000	0,112	0,433
63	1000	0,228	0,815
	2000	0,195	0,706
	3000	0,156	0,613
	4000	0,136	0,546

8	2000	0,230	2,296	0,370	
	3000	0,207	2,483	0,280	
	4000	0,196	2,591	0,227	
10	2000	0,256	1,845	0,298	
	3000	0,236	1,940	0,219	
	4000	0,227	1,993	0,175	
63	8	2000	0,242	2,107	0,485
		3000	0,211	2,326	0,384
		4000	0,195	2,462	0,321
	10	2000	0,138	3,288	0,758
		3000	0,107	4,082	0,673
		4000	0,091	4,683	0,610
12	2000	0,074	5,564	1,282	
	3000	0,043	9,091	1,500	
	4000	0,028	13,714	1,786	

Несинусоїдальність напруги в точці розподілу з енергосистемою на стороні ВН:

$$K_{THD}^{(BH)} = K_{THD}^{(ВП)} K_{ВП-ВН}, \quad (5)$$

де  $K_{ВП-ВН} = K_{ВП-СТ} \cdot K_{СТ-ВН}$  - перерахунок коефіцієнтів через середню точку.

Значна частка промислового навантаження має перетворювачі енергії, тому виконаємо розрахунки коефіцієнтів передачі для розподільчої мережі 0,4 кВ. Вважаємо, що основне джерело несинусоїдальності – вентиляторна установка напругою 6 кВ.

Значення сумарного коефіцієнту гармонійних спотворень на різних ступенях розподілу електроенергії:

$$K_{THD}^{(HH2)} = K_{THD}^{(ВП)} K_{ВП-НН2}, \quad K_{THD}^{(РП)} = K_{THD}^{(ВП)} K_{ВП-РП},$$

$${}^{TM}\Sigma K_{ВП-НН2} = K_{ВП-СТ} \cdot K_{СТ-НН2}.$$

Несинусоїдальність напруги на стороні 0,4 кВ:

$$K_{THD}^{(РПП)} = K_{THD}^{(ВП)} K_{ВП-РП0,4кВ}, \quad (7)$$

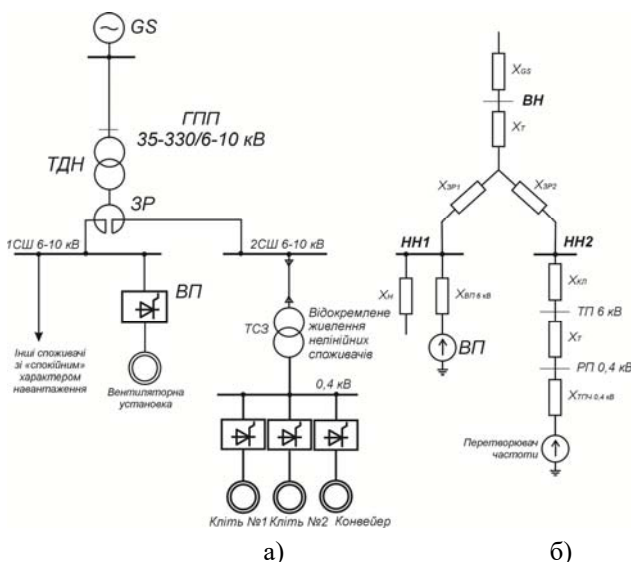
$${}^{TM}\Sigma K_{ВП-РП} = K_{ВП-СТ} \cdot K_{СТ-НН2} \times \times K_{НН2-ТП} \cdot K_{ТП-РП}$$

$$K_{ТП-РП} = \frac{X_{H0,4}}{X_{H0,4} + X_m}; \quad X_{H0,4} = \frac{S_0}{S_{ном} \sin \varphi}.$$

Отримані залежності можуть широко застосовуватися у проектній та інженерній практиці для оперативних розрахунків параметрів електромагнітної сумісності для гнучких та швидкозмінних систем електропостачання для оцінки аварійних, ремонтних схем живлення, а також при децентралізованих обмеженнях потужності енергосистеми.

### V. ВИСНОВКИ

Оціночні методи розрахунків електричних режимів незамінні при експертних оцінках електромагнітної обстановки у автономних та «проблемних» районах електричних мереж, а також у віддалених сільських або гірських місцевостях з обмеженою ви-



**Рисунок 5.** Схема електропостачання підприємства з двообмотковим трансформатором та здовеним реактором (а) та розрахункова схема заміщення (б)

**Таблиця 2.** Значення коефіцієнтів передачі при використанні здовених реакторів

$S_{ном},$ МВА	$X_p,$ %	$S_{КЗ},$ МВА	Коефіцієнти передачі		
			$K_{ВП-СТ}$	$K_{ВП-НН2}$	$K_{ВП-ВН}$
25	4	2000	0,372	1,546	0,164
		3000	0,359	1,578	0,115
		4000	0,352	1,595	0,090
	6	2000	0,207	2,293	0,244
		3000	0,193	2,410	0,176
		4000	0,186	2,472	0,139
40	6	2000	0,349	1,713	0,276
		3000	0,327	1,787	0,201
		4000	0,316	1,827	0,160

хідною інформацією стану та режиму електрообладнання. Особливості коефіцієнтів передачі полягають у здатності швидкої оцінки показників якості напруги у системі електропостачання підприємства при централізованому або автономному живленні споживачів. Ці коефіцієнти дають можливість розрахувати показники електромагнітної сумісності незалежно від місця підключення перетворювача в мережі, потужність яких знаходиться в межах 0.01...4.5 МВт, залежно від потужності КЗ енергосистеми.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Papaika Y. Mathematical modeling of power supply reliability at low voltage quality / Yurii Papaika, Oleksandra Lysenko, Yevgenij Koshelenko, Illa Olishevskiy // *Nauk. Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, - 2021 (2), p.97–103. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-2/097>.
- [2] Pivnyak G. Interharmonics in power supply systems / Gennadiy Pivnyak, Igor Zhezhelenko, Yurii Papaika, Oleksandra Lysenko // *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. - 2017 (6), pp. 109–114. ISSN 20712227.
- [3] Janik P. 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 / Przemyslaw Janik, Grzegorz Kosobudzki, Harald Schwarz // *Higher Education Press and Springer-Verlag*. -2017. Berlin Heidelberg, <https://doi.org/10.1007/s11708-017-0469-3>.
- [4] Pivnyak G. ASSESSMENT OF POWER SUPPLY ENERGY EFFICIENCY BY VOLTAGE QUALITY CRITERION / Gennadiy Pivnyak, Oleksandr Azukovskiy, Yurii Papaika, Careres Cabana Edgar, Olczak Pawel, Artur Dyczko // *Rynek Energii*. - 2021 № 4(155). p. 75-84. ISSN 14255960.
- [5] IEEE 1547:2003-Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power System.
- [6] Standard IEC61000-2-4–2002. Electromagnetic compatibility (EMC)–Part 2-4: environment-compatibility levels in industrial plants for low-frequency conducted disturbances.
- [7] CENELEC EN 50160–2010. Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks.
- [8] Pivniak H. Problems of development of innovative power supply systems of Ukraine in the context of European integration / H. Pivniak, O. Aziukovskiy, Yu. Papaika, I. Lutsenko, N. Neuberger // *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. - 2022 (5), 89–103. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-5/089>.
- [9] Shcherba M. Mathematical Modeling of Electric Current Distribution in Water Trees Branches in XLPE Power Cables Insulation / M. Shcherba, A. Shcherba, Y. Peretyatko // *Proc. IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems. ESS 2020*. Kyiv, Ukraine, May 12-14, 2020. p. 353–356. <https://doi.org/10.1109/ESS50319.2020.9160293>.
- [10] ДСТУ EN 50160:2014 (2014). Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності, Київ, Мінекономрозвитку України, 27.
- [11] Сокол Є.І. Несинусоїдальні і несиметричні режими в електроенергетичних системах / Є.І. Сокол, Г.А. Сендерович, О.Г. Гриб та ін. – Харків:ФОП Бровін О.В., 2021. -202 с.
- [12] Smolenski R. Conducted electromagnetic interference (EMI) in Smart Grids / R. Smolenski. London, Springer, 2017, 198 pp.
- [13] Babak S. Analysis of UAVs and Their Technical Parameters for Overhead Power Lines Monitoring / S. Babak, A. Zaporozhets, O. Gryb, I. Karpaliuk // *Studies in Systems, Decision and Control*. – 2023. 454, p. 181–193 [https://doi.org/10.1007/978-3-031-22464-5\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-031-22464-5_10).
- [14] Sokol Y. Theoretical Basis of Determination of Corona Discharge Coordinates by Acoustic Radiation / Y. Sokol, V. Babak, A. Zaporozhets, O. Gryb, I. Karpaliuk, R. Demianenko // *Studies in Systems, Decision and Control*, – 2024. 509, p. 137–153. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-44025-0\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-031-44025-0_7).
- [15] El Hajji. The electromagnetic interference caused by high voltage power lines along the electrical railway equipment / El Hajji, H. Mahmoudi and M. Labbadi // *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 10, no. 5. - 2020, p. 4581–4891. <https://doi.org/10.11591/ijece.v10i5>.
- [16] Dusza D. Reactive power measurements based on its geometrical interpretation / D. Dusza, G. Kosobudzki // *2018 14th Selected Issues of Electrical Engineering and Electronics, WZEE*. - 2018, 8749118. <https://doi.org/10.1109/WZEE.2018.8749118>.

Стаття надійшла до редакції 25.07.2024 р.

## DETERMINATION OF VOLTAGE QUALITY INDICATORS IN INDUSTRIAL POWER SUPPLY SYSTEMS WITH LIMITED ENERGY SYSTEM CAPACITY

PAPAİKA YU.A. Doctor of science, Professor, Head of the electrical power engineering department of the

- Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine, e-mail: papaika.yu.a@nmu.one, ORCID: 0000-0001-6953-1705;
- LYSENKO O.G.** Ph.D, Associate professor, Associate professor of the electrical drive department of the Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine, e-mail: lysenko.o.g@nmu.one, ORCID: 0000-0002-7041-671X;
- MALYSHKO M.M.** Postgraduate student of the electrical power engineering department of the Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine, e-mail: malyshko.m.m@nmu.one, ORCID: 0009-0000-0413-053X;
- UDOVYK O.V.** Postgraduate student of the electrical power engineering department of the Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine, e-mail: udovyk.o.v@nmu.one, ORCID: 0009-0002-1000-7815.

**Purpose.** To justify the dependence of the determination of indicators of electromagnetic compatibility of power supply systems of industrial enterprises in the presence of powerful nonlinear and asymmetric loads in conditions of limited power system capacity.

**Methodology.** Methods of theoretical electrical engineering for the construction of replacement schemes of three-phase electrical networks, Fourier series for the analysis of higher harmonics of current and voltage, the method of symmetrical components for the analysis of asymmetry.

**Findings.** Виділено основні показники якості напруги, значення яких залежить від параметрів живлячої електроенергетичної системи (потужності короткого замикання). Наведено аналітичні залежності розрахунку показників несиметрії та несинусоїдальності при обмеженні потужності КЗ. Проаналізовано засоби корекції показників якості в умовах електричних мереж з розподіленою генерацією.

**Originality.** The scientific novelty consists in establishing the patterns of changes in the mode parameters of the industrial load from the parameters of the power system, which is expressed in interrelated changes in voltage quality indicators. At the same time, in the analytical models, the option of obtaining variable changes in the parameters of the power system both due to the generating capacities and through the parameters of the substitution schemes of electrical networks of different voltage classes has been added.

**Practical value.** For engineering calculations, simplified algorithms for determining voltage quality indicators (deviation, oscillation, asymmetry and non-sinusoidal voltage) are proposed, taking into account the real configuration of the electrical network and the actual power of the power system. This makes it possible to evaluate the efficiency of transmission and conversion of electricity under an arbitrary configuration of the post-emergency power supply scheme.

**Keywords:** voltage quality; higher harmonics; voltage asymmetry, voltage fluctuations.

## REFERENCES

- [1] Papaika Y. Mathematical modeling of power supply reliability at low voltage quality / Yurii Papaika, Oleksandra Lysenko, Yevgenij Koshelenko, Illa Olishchivskyi // *Nauk. Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, - 2021 (2), p.97–103. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-2/097>.
- [2] Pivnyak G. Interharmonics in power supply systems / Gennadiy Pivnyak, Igor Zhezhelenko, Yurii Papaika, Oleksandra Lysenko // *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. - 2017 (6), pp. 109–114. ISSN 20712227.
- [3] Janik P. 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 / Przemyslaw Janik, Grzegorz Kosobudzki, Harald Schwarz // *Higher Education Press and Springer-Verlag*. -2017. Berlin Heidelberg, <https://doi.org/10.1007/s11708-017-0469-3>.
- [4] Pivnyak G. ASSESSMENT OF POWER SUPPLY ENERGY EFFICIENCY BY VOLTAGE QUALITY CRITERION / Gennadiy Pivnyak, Oleksandr Azukovskiy, Yurii Papaika, Careres Cabana Edgar, Olczak Pawel, Artur Dyczko // *Rynek Energii*. - 2021 № 4(155). p. 75-84. ISSN 14255960.
- [5] IEEE 1547:2003-Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power System.
- [6] Standard IEC61000-2-4–2002. Electromagnetic compatibility (EMC)–Part 2-4: environment-compatibility levels in industrial plants for low-frequency conducted disturbances.
- [7] CENELEC EN 50160–2010. Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks.
- [8] Pivniak H. Problems of development of innovative power supply systems of Ukraine in the context of European integration / H. Pivniak, O. Aziukovskiy, Yu. Papaika, I. Lutsenko, N. Neuberger // *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. - 2022 (5), 89–103. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-5/089>.
- [9] Shcherba M. Mathematical Modeling of Electric Current Distribution in Water Trees Branches in XLPE Power Cables Insulation / M. Shcherba, A. Shcherba, Y. Peretyatko // *Proc. IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems. ESS 2020*. Kyiv,

- Ukraine, May 12-14, 2020. p. 353–356. <https://doi.org/10.1109/ESS50319.2020.9160293>.
- [10] DSTU EN 50160:2023 (2023). *Haracterystyky napruhy elektropostaczannya v mererzach zagalnego przyznaczenya*, Kyiv, Minekonomrozvytku Ukrainy. (Characteristics of power supply voltage in general-purpose electrical networks, Kyiv, Ministry of Economic Development of Ukraine), 27.
- [11] Sokol E.I. *Nesynusoidalni ta nesymetriczni rezhymy v electroenergetycznych systemach (Non-sinusoidal and non-symmetric modes in electric power systems)* / E.I Sokol, G.A. Senderovicz, O.G. Gryb and others. – Kharkiv: FOP Brovin O.V., 2021. -202 p.
- [12] Smolenski R. *Conducted electromagnetic interference (EMI) in Smart Grids* / R. Smolenski. London, Springer, 2017, 198 pp.
- [13] Babak S. *Analysis of UAVs and Their Technical Parameters for Overhead Power Lines Monitoring* / S. Babak, A. Zaporozhets, O. Gryb, I. Karpaliuk // *Studies in Systems, Decision and Control*. – 2023. 454, p. 181–193 [https://doi.org/10.1007/978-3-031-22464-5\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-031-22464-5_10).
- [14] Sokol Y. *Theoretical Basis of Determination of Corona Discharge Coordinates by Acoustic Radiation* / Y. Sokol, V. Babak, A. Zaporozhets, O. Gryb, I. Karpaliuk, R. Demianenko // *Studies in Systems, Decision and Control*, – 2024. 509, p. 137–153. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-44025-0\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-031-44025-0_7).
- [15] El Hajji. *The electromagnetic interference caused by high voltage power lines along the electrical railway equipment* / El Hajji, H. Mahmoudi and M. Labbadi // *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 10, no. 5. - 2020, p. 4581-4891. <https://doi.org/10.11591/ijece.v10i5>.
- [16] Dusza D. *Reactive power measurements based on its geometrical interpretation* / D. Dusza, G. Kosobudzki // *2018 14th Selected Issues of Electrical Engineering and Electronics, WZEE*. - 2018, 8749118. <https://doi.org/10.1109/WZEE.2018.8749118>.

## ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛУ СИМЕТРИЧНИХ СКЛАДОВИХ В ЕЛЕКТРИЧНІЙ СИСТЕМІ З ДИЗЕЛЬ ГЕНЕРАТОРНОЮ УСТАНОВКОЮ ПРИ НЕСИМЕТРИЧНОМУ НАВАНТАЖЕННІ

- БЯЛОБРЖЕСЬКИЙ О.В.** канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електротехніки Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського, Кременчук, Україна, e-mail: bialobrzieski@ukr.net, orcid.org/0000-0003-1669-4580;
- ОЛІЙНІЧЕНКО М.Ю.** аспірант кафедри електротехніки Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського, Кременчук, Україна, e-mail: oliynichenko@kdu.edu.ua, orcid.org/0000-0001-6651-0175;
- ВОРОНА В.В.** магістрант кафедри електротехніки Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського, Кременчук, Україна, e-mail: vvlaalvv@gmail.com, orcid.org/0009-0004-4899-9367;
- ЯКИМЕЦЬ С.М.** канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електротехніки Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського, Кременчук, Україна, e-mail: ysm@meta.ua, orcid.org/0000-0002-2797-2796.

**Мета роботи.** Дослідження симетричних складових струму та напруги в елементах мікромережі з автономним синхронним генератором обмеженої потужності, який працює паралельно з мережевим трансформатором за умови несиметричного навантаження.

**Методи дослідження.** Під час проведення дослідження використано методи візуального програмування в пакеті Simulink/Matlab, методи теорії електротехніки в частині визначення симетричних складових струмів та напруг в гілках спостереження, методи синтезу схем заміщення елементів електроенергетичних систем для симетричних складових струмів, методи обробки даних та побудови діаграм з використанням профільних програмних засобів.

**Отримані результати.** В результаті аналізу відомих досліджень встановлено, що за умови дослідження генеруючих систем малої потужності в умовах несиметрії недостатньо уваги приділяється характеру несиметричного навантаження. З використанням відомої структури мікромережі, яка включає синхронний генератор, машинне навантаження та трансформатор зовнішньої мережі, побудовано її модель в якій шляхом введення несиметричного навантаження різного типу реалізовано серії експериментів з реєстрацією напруг та струмів прямої, зворотної та нульової послідовностей в гілках мережі. Аналіз отриманих в ході дослідження результатів встановив, що напруга прямої послідовності у разі зміни активного навантаження змінює свого рівня, за тих же обставин у разі активно-ємнісного та активно-індуктивного навантаження зміна напруги має протилежний характер. У разі зростання несиметрії активно-індуктивного характеру напруга прямої послідовності знижується, а у разі активно-ємнісного збільшується. Зазначені зміни в деяких випадках перевищують 3%. Струми прямої послідовності у разі небалансу активного навантаження відрізняються незначним чином. У разі прямої послідовності струму трансформатора спостерігається безперервне його зростання, яке у випадку активно-ємнісного, та активно-індуктивного навантаження перевищує активне в середньому в 1,5 рази. Струми нульової послідовності в досліджуваній моделі, які утворені несиметричним навантаженням, повністю замикаються на трансформатор, викликаючи напруги нульової послідовності, а характер несиметричного навантаження суттєво впливає на значення цих струмів, відмічене зростання на 61%.

**Наукова новизна.** Встановлено, що в мікромережі, яка включає синхронний генератор, машинне навантаження, симетричне активне навантаження, співставної з генератором потужності, трансформатор зовнішньої мережі, окрім самого факту несиметрії викликаного несиметричним навантаженням суттєвий вплив на симетричні складові має і характер несиметричного навантаження (активний, активно-індуктивний чи активно-ємнісний).

**Практична цінність.** За умови використання в мікромережах пристроїв які забезпечують підвищення якості електричної енергії, наприклад симетруючих, необхідно прийняти до уваги окрім фактору несиметрії ще й характер навантаження, яке останню викликає.

**Ключові слова:** несиметричне навантаження, симетричні складові, активно-індуктивне навантаження, активно-ємнісне навантаження..

## I. ВСТУП

В мікромережі в якій основним джерелом електроенергії являються сонячні, вітрові та інші альтернативні джерела електроенергії часто для підтримання стабільного електропостачання використовують дизельні генератори. Така мікромережа може працювати як автономно так і бути підключеною до іншої мережі [1]. Не зважаючи на переваги в наявності дизельного генератора для мікромережі існує багато технічних аспектів і проблем, які ще не до кінця вивчені та вирішені. Одним з таких питань являється стабільність роботи мікромережі при несиметричному навантаженні. Дослідження в напрямку стабільності роботи мікромережі проводилися, але систематичних аналізів систем розподілу в несиметричних умовах не було достатньо проведено [2].

## II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

В роботах [3] та [4] розглядається якість напруги при наявності несиметричного навантаження в ізолюваній мікромережі з синхронним генератором, а саме відношення амплітуд зворотної та прямої послідовностей. Запропоновано підхід для усунення зворотної послідовності з використанням методу компенсації затримки та використання ПІ контролера. Ефективність методу підтверджується результатами [3], при вихідному дисбалансу напруги 7,5%, ступінь збалансованої напруги становить 0,17%. В роботі [5] вводиться система джерела напруги на основі перетворювача постійного струму високої напруги, яка з використанням методу розділу прямої та зворотної послідовностей фільтром комплексного коефіцієнта, може ефективно зменшити дисбаланс напруги та покращити якість електроенергії, ефективність підтверджується результатами, коефіцієнт не симетрії складає 1% після компенсації. Автори не розглядають взаємний вплив на рівень небалансу елементів електроенергетичної системи за умови різного рівня реактивної потужності та її характеру. В роботі [6] розглядається метод формування більш пропорційного розподілу несиметричного струму в ізолюваній розподільчій мережі за рахунок розділення компонентів прямої та зворотної послідовності. Отримані результати в ході дослідження підтверджують ефективність покращення розподілу не симетрії струмів в ізолюваній розподільчій мережі, але при цьому не приділяється увазі фактору дефіциту чи надлишку реактивної потужності.

Дослідники [7] зазначають, що вітрові турбіни відчують значні незбалансовані навантаження під час роботи, що посилюються зовнішніми обуреннями, які впливають на вихідну потужність. Це викликає необхідність вдосконалення систем регулювання режимом автономної енергетичної установки. Для усунення небалансу розробляються ємнісні балансувачі пристрої [8], які стають корисними в сучасних розподільчих мережах з високим вмістом джерел розподіленої енергії, де невірноважені передачі потужності в мережу вищої напруги відбуваються все частіше в результаті надлишкової потужності, що виробляється. Однак у такому разі необхідно враховувати характер реактив-

ної потужності створюваної пристроєм компенсації. Незбалансоване трифазне навантаження та незбалансований опір мережі є прикладами проблем незбалансованої мережі, які досліджені в роботі [9]. Реальна та реактивна потужність, що подається в мережу, коливається на значну величину в цих незбалансованих умовах. За результатами досліджень автори пропонують метод двоспрямованого управління реальною та реактивною потужністю трифазного інвертора, підключеного до мережі, в умовах незбалансованої мережі. Для розрахунку опорних струмів інвертора з компонентів негативної та нульової послідовності вимірюваних струмів використовується підхід вилучення симетричних компонентів у часовій області. Пропонований підхід коригує незбалансовані мережні струми та незбалансовані напруги РСС та забезпечує бажану реальну та реактивну потужність для мережі за наявності незбалансованих ситуацій.

Таким чином узагальнюючи вище наведені дослідження відзначимо, що дослідження впливу несиметричного навантаження проводяться і наводяться методи для ефективного вирішення незбалансованості напруги в розподільчій мережі, як в ізолюваній мережі, так і в мережі яка з'єднана з зовнішньою мережею. Але при цьому питання впливу ємнісного чи індуктивного характеру реактивної потужності в подібних системах залишається недослідженим.

## III. МЕТА РОБОТИ

Дослідження симетричних складових струму та напруги в елементах мікромережі з автономним синхронним генератором обмеженої потужності, який працює паралельно з мережевим трансформатором за умови несиметричного навантаження.

## IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГУ МАТЕРІАЛУ І АНАЛІЗ ОТРИМАННИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Розглянемо комплекс дизель-генераторної системи [10] з навантаженням та зовнішньою мережею за структурою представленою на рис. 1, яка складається з таких елементів: дизельного двигуна (ДД), системи збудження (СЗ), синхронної машини (СМ), навантаження (Н), несиметричного навантаження (НН), трансформатора з заземленою нейтраллю (ТР) та мережі.

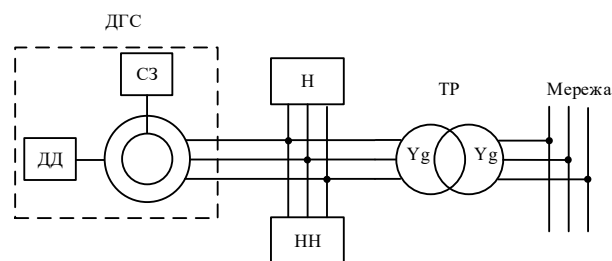
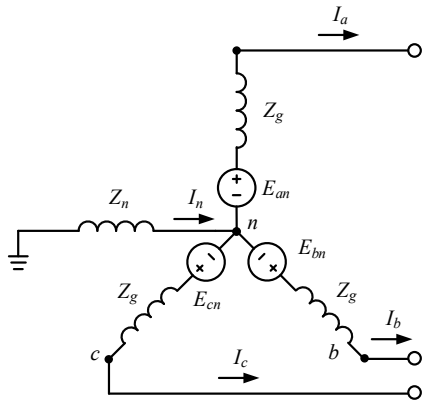


Рисунок 1. Структурна схема дизель генераторної системи під'єднаної до мережі

Симетричні складові струмів та напруг в синхронному генераторі можна розрахувати за схемою заміщення яка наведена на рис. 2. [11].



**Рисунок 2.** Схема заміщення синхронного генератора.

В такому випадку пряма послідовність напруги статора синхронної машини:

$$\dot{U}_{an}^{(1)} = \dot{E}_{an} - j\omega(L_s + M_s) \dot{I}_a^{(1)} = \dot{E}_{an} - Z_{g1} \dot{I}_a^{(1)}, \quad (1)$$

Зворотна послідовність напруги статора синхронної машини:

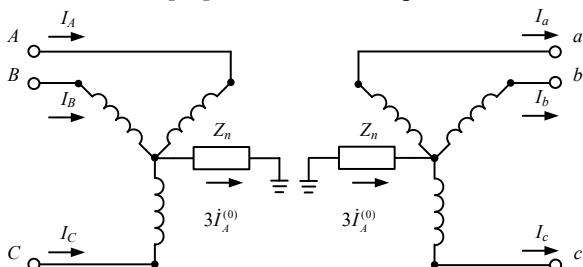
$$\dot{U}_{an}^{(2)} = -j\omega(L_s + M_s) \dot{I}_a^{(2)} = -Z_{g2} \dot{I}_a^{(2)}. \quad (2)$$

Нульова послідовність напруги статора синхронної машини:

$$\dot{U}_{an}^{(0)} = -j\omega(L_s + M_s) \dot{I}_a^{(0)} + j3\omega M_s \dot{I}_a^{(0)} = -Z_{g0} \dot{I}_a^{(0)}. \quad (3)$$

де  $Z_g = Z_{g1}$  - повний опір прямої послідовності,  $Z_g = Z_{g2}$  - повний опір зворотної послідовності,  $Z_g = Z_{g0}$  - повний опір нульової послідовності,  $\dot{E}_{an}$  - електрорушійної сила обмотки статора,  $M_s$  - комплексна загальна взаємодукція кола статора,  $L_s$  - комплексна індуктивність обмоток статора,  $\dot{I}_a^{(0)}$  - струм нульової послідовності,  $\dot{I}_a^{(1)}$  - струм прямої послідовності,  $\dot{I}_a^{(2)}$  - струм зворотної послідовності.

Несиметричні складові в трансформаторі з'єднаного зіркою із заземленою нейтралю на вищій та нижчій стороні напруги можна розрахувати за схемою заміщення [12] яка наведена на рис. 3.



**Рисунок 3.** Схема заміщення трифазного трансформатора з заземленою нейтралю

Напруга, виміряна відносно землі на стороні високої напруги, складає:

$$\begin{aligned} \dot{U}_A &= \dot{U}_{AN} + \dot{U}_N = \dot{U}_A^{(0)} + \dot{U}_A^{(1)} + \dot{U}_A^{(2)} = \\ &= (\dot{U}_{AN}^{(0)} + \dot{U}_{AN}^{(1)} + \dot{U}_{AN}^{(2)}) + 3Z_N \dot{I}_A^{(0)}. \end{aligned} \quad (4)$$

де  $\dot{I}_A^{(0)}$  - струм фази нульової послідовності.

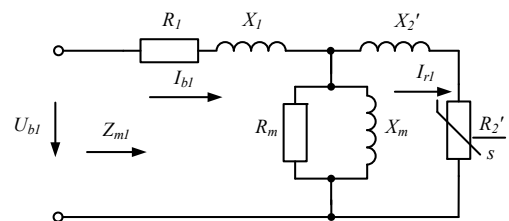
Для сторони низької напруги розрахунки аналогічні. Послідовності на обох сторонах трансформатора пов'язані співвідношенням:

$$\begin{aligned} \frac{N_1}{N_2} \dot{U}_a^{(0)} &= \dot{U}_A^{(0)} - 3 \left[ Z_N - Z_n \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^2 \right] \dot{I}_A^{(0)}; \\ \frac{N_1}{N_2} \dot{U}_a^{(1)} &= \dot{U}_A^{(1)}; \quad \frac{N_1}{N_2} \dot{U}_a^{(2)} = \dot{U}_A^{(2)}. \end{aligned} \quad (6)$$

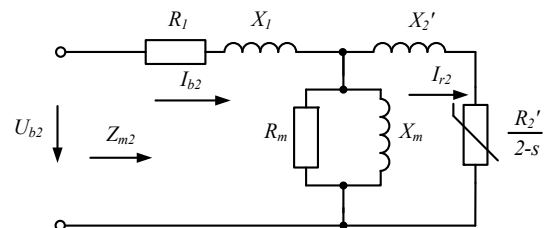
де  $N_1$  - кількість витків первинної обмотки,  $N_2$  - кількість витків вторинної обмотці;  $Z_N$  - опір заземлення первинної обмотки;  $Z_n$  - опір заземлення вторинної обмотки.

Зважаючи що асинхронна машина не має нульового проводу, то нульова послідовність струму статора відсутня. Пряма та зворотна послідовності струмів статора індукують два поля, що обертаються протилежно [13].

Якщо всі швидкості взяти як частину синхронної швидкості, ковзання дорівнює  $s$ , а швидкість ротора дорівнює  $(1-s)$ . Поле, що обертається індукуює в роторі напруги частоти ковзання, у той час як поле, що обертається у зворотному напрямку індукуює в роторі е.р.с частоти  $(2-s)$ , помноженої на частоту живлення  $f$ . Кола прямої та зворотної послідовності на фазу показані на рис. 2, на якому  $U_{b1}$  і  $U_{b2}$  - це напруги прямої та зворотної послідовності фази b двигуна, яка взята як наша опорна фаза  $U_{b1} = I_{b1} Z_{m1}$ ,  $U_{b2} = I_{b2} Z_{m2}$ , де  $Z_{m1}$  та  $Z_{m2}$  є імпедансом  $I. M$  до струмів прямої та зворотної послідовності



**Рисунок 4.** Схема заміщення асинхронного двигуна з прямою послідовністю струму



**Рисунок 5.** Схема заміщення асинхронного двигуна зі зворотною послідовністю струму

Результуючі струми фаз статора можна отримати шляхом накладання складових струмів прямої та зворотної послідовності в різних фазах. В роторі струми прямої та зворотної послідовності мають дві різні частоти  $sf$  та  $2-sf$  відповідно. Струми фаз ротора, відносно статора дорівнюють середньому квадратичному

значенню величин віднесених струмів ротора прямої та зворотної послідовності,  $I_{r1}$  та  $I_{r2}$  відповідно. Застосовуючи метод симетричних складових [14] вирази для визначення струмів статора прямої та зворотної послідовності  $i_b^{(1)}$  та  $i_b^{(2)}$  через опори  $Z_a$ ,  $Z_b$  та  $Z_c$  та лінійної напруги.

$$i_b^{(1)} = \frac{U(-ja^2\sqrt{3}Z_{m2} - Z_b + aZ_c) + P(j\sqrt{3}Z_{m2} - a^2Z_a + aZ_c)}{-j\sqrt{3}[Z_{m1}(3Z_{m2} + Z_a + Z_b + Z_c) + Z_{m2}(Z_a + Z_b + Z_c) + Z_a(Z_b + Z_c) + Z_b + Z_c]} \quad (7)$$

$$i_b^{(2)} = \frac{U(-ja\sqrt{3}Z_{m1} + Z_b - a^2Z_c) - P(-j\sqrt{3}Z_{m1} - aZ_a + a^2Z_c)}{-j\sqrt{3}[Z_{m1}(3Z_{m1} + Z_a + Z_b + Z_c) + Z_{m2}(Z_a + Z_b + Z_c) + Z_a(Z_b + Z_c) + Z_b + Z_c]} \quad (8)$$

Для дослідження розподілу несиметричних складових для схеми наведеної на рис. 1 побудовано відому модель [10] мережі з дизель-генераторною установкою та несиметричним навантаженням в програмному середовищі Matlab/Simulink (рис. 6). Вважатимемо, що дизельний двигун забезпечує стабільну потужність. Модель складається з наступних блоків: синхронний генератор (SM) частота 50 Гц, напруга 400 В, потужність 31,3 кВА, частота обертання 1500 об/хв. Асинхронний двигун (AM) частота 50 Гц, напруга 400 В, потужність 15 кВт, частота обертання 460 об/хв. Блок трифазного навантаження (30 W load) частота 50 Гц, напруга 400 В, потужність 30 Вт. Блок трансформатора (Transformer 10 kV / 400 MVA) напругою на первинній обмотці 10 кВ на вторинній обмотці 400 В, потужністю 60 кВА. Блок трифазного джерела жив-

лення (10 kV 10 MVA) напругою 10 кВ, потужністю 10 MVA та частотою 50 Гц. Блок трифазного навантаження (50 kW load), частота 50 Гц, напруга 10кВ, потужність 50 кВт. Блок несиметричного навантаження (Asymmetrical load). Блок вимірювання гілки синхронної машини (Three-Phase V-I Measurement SM), блок вимірювання гілки асинхронного двигуна (Three-Phase V-I Measurement AM), блок вимірювання гілки зовнішньої мережі (Three-Phase V-I Measurement TR), вимірювальний блок (Measurement block).

На рисунку 7 наведено підсистему в якій за допомогою блоків (Sequence Analyzer) відбувається аналіз послідовностей напруги та струму на кожній гілці. Дані обробляються та зводяться до однієї таблиці (DATA).

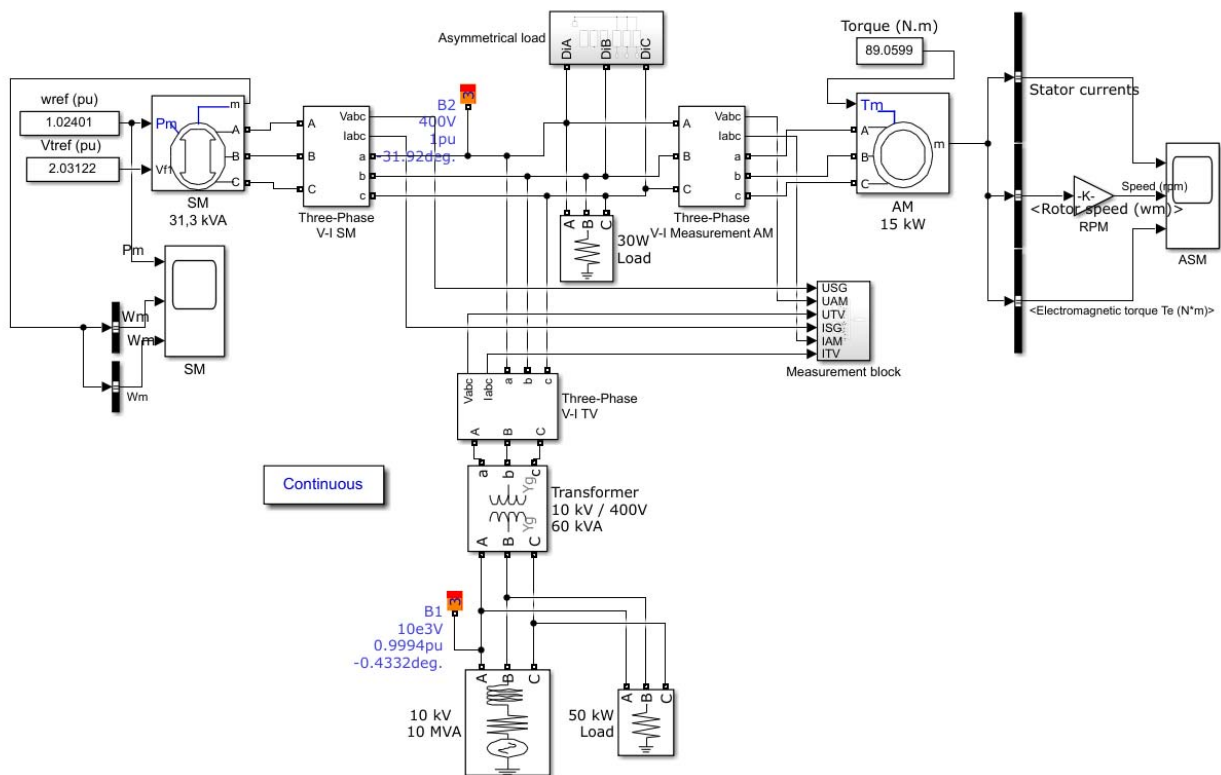


Рисунок 6. Модель мережі з дизель-генераторною установкою та несиметричним навантаженням в пакеті Simulink/Matlab



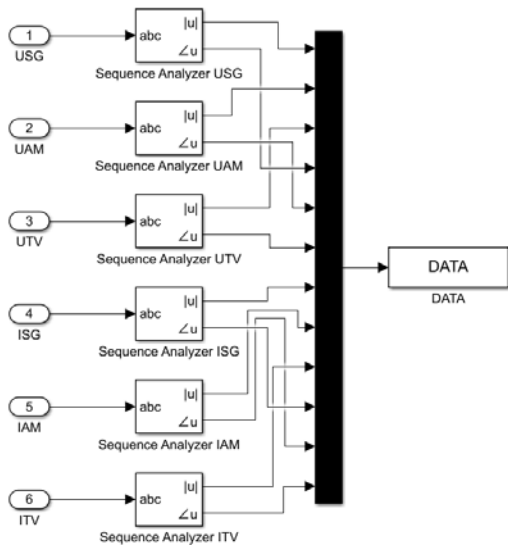


Рисунок 7. Вимірвальний блок симетричних складових

В блоці Sequence Analyzer виконується ланка операцій, в результаті чого визначаються симетричні складові. По-перше, визначення модуля та фазового зсуву відповідного електричного параметру за основною частотою ( $\omega$ ), наприклад для струму фази А:

$$I_{a.A} = \frac{\omega}{2\pi} \int_0^{2\pi/\omega} i_a \sin(\omega t); \quad I_{b.A} = \frac{\omega}{2\pi} \int_0^{2\pi/\omega} i_a \cos(\omega t); \quad (9)$$

$$I_A = \sqrt{I_{a.A}^2 + I_{b.A}^2}; \quad \psi_{I.A} = \arctg \frac{I_{b.A}}{I_{a.A}}; \quad (10)$$

де  $i_a$  - миттєве значення струму фази А;  $I_{a.A}$ ,  $I_{b.A}$  - ортогональні складові струму фази А;  $I_A$ ,  $\psi_{I.A}$  - амплітуда та початкова фаза струму фази А. Аналогічно визначають параметри струмів та напруг інших фаз.

По-друге, з використанням оператора зсуву  $a = e^{j2\pi/3}$  визначають у комплексному вигляді струми прямої  $\dot{I}_1$ , зворотної  $\dot{I}_2$  та нульової  $\dot{I}_0$  послідовностей:

$$\dot{I}_1 = 1/3(I_A e^{j\psi_{I.A}} a^0 + I_B e^{j\psi_{I.B}} a^1 + I_C e^{j\psi_{I.C}} a^2); \quad (11)$$

$$\dot{I}_2 = 1/3(I_A e^{j\psi_{I.A}} a^0 + I_B e^{j\psi_{I.B}} a^2 + I_C e^{j\psi_{I.C}} a^1); \quad (12)$$

$$\dot{I}_0 = 1/3(I_A e^{j\psi_{I.A}} a^0 + I_B e^{j\psi_{I.B}} a^0 + I_C e^{j\psi_{I.C}} a^0). \quad (13)$$

Аналогічні визначають симетричні складові напруги. Дослідження режиму роботи наведеної моделі з позиції розподілу симетричних складових струму та напруги виконано в три етапи: перший – несиметричне активне навантаження; другий – несиметричне активно-індуктивне навантаження; третій – несиметричне активно-емнісне навантаження. На кожному етапі реалізовано ряд експериментів зі зміною повного опору фаз несиметричного навантаження. Комбінації повного опору несиметричного навантаження використані в ході експериментів зведені у таблицю 1.

Таблиця 1. Розподіл повного опору навантаження

№	$Z_A, \text{Ом}$	$Z_B, \text{Ом}$	$Z_C, \text{Ом}$
1	10	10	10
2	15	10	10
3	20	10	10
4	15	15	10
5	20	15	10
6	20	20	10

Забезпечення підтримки повного опору наведено в таблиці 1 на всіх етапах виконується наступним чином. На першому етапі у разі активного навантаження повний опір дорівнює активному опору. На другому етапі, у разі активно-індуктивного навантаження, активний опір  $R$  залишається незмінним на рівні 10 Ом параметри індуктивності задаються відповідно до формули:

$$L = \frac{\sqrt{|Z|^2 - R^2}}{\omega}, \quad (14)$$

де  $\omega$  - кутова частота зміни струму кола. На третьому етапі виконано дослідження з активно-емнісним навантаженням. Як і на попередньому етапі активний опір залишається без змін, а ємність змінюється за формулою:

$$C = \frac{1}{\omega \sqrt{|Z|^2 - R^2}}, \quad (15)$$

Часові діаграми для проміжного експерименту у разі активного несиметричного навантаження наведені на рисунку 8. Результати серії експериментів для трьох етапів зведені до таблиці 2.

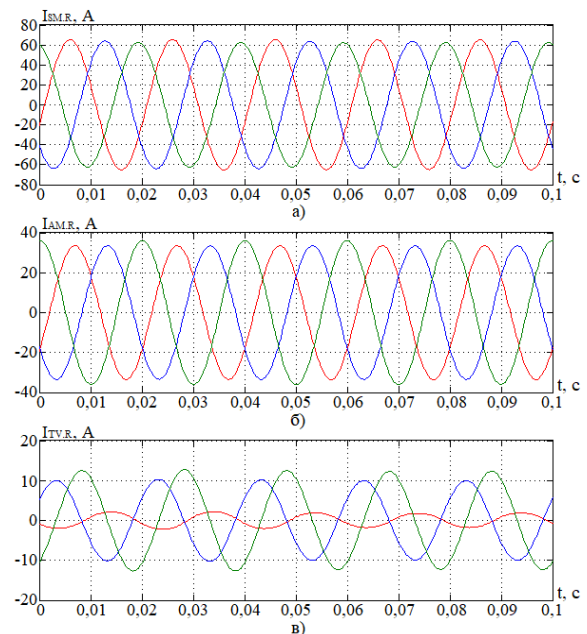


Рисунок 8. Часові діаграми струму при активному несиметричному навантаженні в гілках а) синхронного генератора; б) асинхронної машини в) зовнішньої мережі.

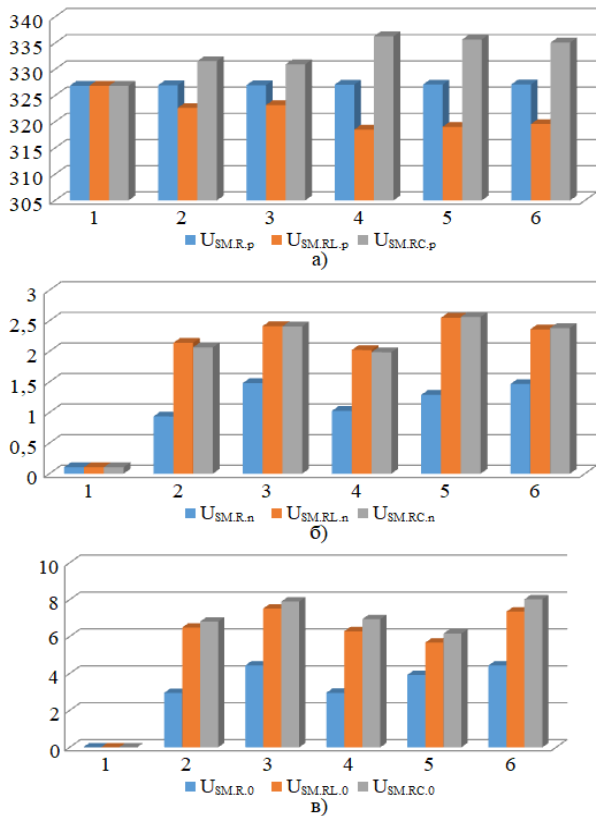
Таблиця 2. Зведені дані отримані в ході експериментів з різними типами навантаження

№	$Z_R$			$Z_{RL}$			$Z_{RC}$		
	$U_{SGp}$ , В	$U_{SGn}$ , В	$U_{SG0}$ , В	$U_{SGp}$ , В	$U_{SGn}$ , В	$U_{SG0}$ , В	$U_{SGp}$ , В	$U_{SGn}$ , В	$U_{SG0}$ , В
1	326,86	0,11	0,00	326,86	0,11	0	326,86	0,11	0
2	326,95	0,94	2,95	322,63	2,14	6,49	331,56	2,07	6,82
3	326,97	1,48	4,44	323,17	2,41	7,52	330,96	2,41	7,9
4	327,07	1,03	2,95	318,5	2,02	6,29	336,29	1,99	6,95
5	327,09	1,29	3,92	319,03	2,55	5,68	335,69	2,56	6,16
6	327,11	1,47	4,43	319,55	2,36	7,35	335,09	2,38	8,02
№	$I_{SGp}$ , А	$I_{SGn}$ , А	$I_{SG0}$ , А	$I_{SGp}$ , А	$I_{SGn}$ , А	$I_{SG0}$ , А	$I_{SGp}$ , А	$I_{SGn}$ , А	$I_{SG0}$ , А
1	63,79	0,03	0,00	63,79	0,03	0,00	63,79	0,03	0,00
2	63,78	1,18	0,00	64,4	2,57	0,00	63,08	2,77	0,00
3	63,76	1,77	0,00	64,34	3,01	0,00	63,16	3,21	0,00
4	63,75	1,20	0,00	65,08	2,63	0,00	62,37	2,76	0,00
5	63,75	1,57	0,00	64,99	3,33	0,00	62,46	3,55	0,00
6	63,74	1,81	0,00	64,91	3,07	0,00	62,55	3,2	0,00
№	$I_{AMP}$ , А	$I_{AMn}$ , А	$I_{AM0}$ , А	$I_{AMP}$ , А	$I_{AMn}$ , А	$I_{AM0}$ , А	$I_{AMP}$ , А	$I_{AMn}$ , А	$I_{AM0}$ , А
1	34,34	0,01	0,00	34,34	0,01	0,00	34,34	0,01	0,00
2	34,33	1,34	0,00	34,64	2,88	0,00	34,04	3,12	0,00
3	34,34	2,02	0,00	34,58	3,38	0,00	34,08	3,62	0,00
4	34,33	1,34	0,00	34,91	2,96	0,00	33,76	3,09	0,00
5	34,32	1,77	0,00	34,88	3,74	0,00	33,8	3,98	0,00
6	34,32	2,01	0,00	34,83	3,45	0,00	33,83	3,58	0,00
№	$I_{TVp}$ , А	$I_{TVn}$ , А	$I_{TV0}$ , А	$I_{TVp}$ , А	$I_{TVn}$ , А	$I_{TV0}$ , А	$I_{TVp}$ , А	$I_{TVn}$ , А	$I_{TV0}$ , А
1	1,82	0,01	0,00	1,82	0,01	0	1,82	0,01	0
2	2,48	1,15	3,61	6,68	2,57	7,85	7,82	2,6	8,35
3	4,16	1,72	5,43	8,09	2,96	9,17	8,66	3,02	9,67
4	5,93	1,13	3,61	15,1	2,46	7,69	15,57	2,56	8,5
5	7,73	1,47	4,80	16,34	3,12	6,94	16,51	3,31	7,54
6	9,51	1,68	5,42	17,73	2,87	9	17,75	2,97	9,82

Для покращення сприйняття чисельної інформації отриманої в таблиці 2 побудуємо діаграми зміни параметрів за серією експериментів за етапами. Зважаючи на те, що усі генеруючі елементи та елементи споживання під'єднані до одного вузла в першу чергу розглянемо складові напруги прямої, зворотної та нульової послідовностей (рис. 9) в залежності від характеру несиметричного навантаження. Напруга прямої послідовності у разі зміни активного навантаження не змінює свого рівня (рис. 9. а), за умови тих же обставин у разі активно-ємнісного та активно-індуктивного навантаження зміна напруги має протилежний характер. У разі зростання несиметрії активно-індуктивного характеру напруга прямої послідовності знижується, а у разі активно-ємнісного збільшується. Зазначені зміни в деяких випадках перевищують 3%. Напруга зворотної послідовності (рис. 9 б) відносно напруги прямої послідовності має невелике значення та має однаковий характер зміни. Значення напруги зворотної послідовності досить невеликі та у разі зміни ємності чи індуктивності суттєво не відрізняються. Певним чином інша картина спостерігається у діаграмі зміни напруги нульової послідовності

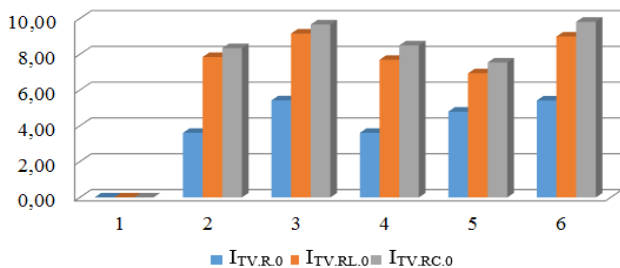
(рис. 9. в.), в якій суттєво відрізняється вплив характеру навантаження, активно-ємнісне навантаження призводить до більшого впливу ніж активно-індуктивне. Узагальнюючи результати наведені на рис. 9 раціонально констатувати достатньо невеликий вміст несиметрії напруги у вузлі.

Розглянемо діаграми розподілу струму у гілках схеми. Діаграми струму прямої послідовності наведені на рисунку 10. Струми прямої послідовності у разі небалансу активного навантаження відрізняються незначним чином. Лише у разі прямої послідовності струму трансформатора спостерігається безперервне зростання, яке у разі активно-ємнісного, та активно-індуктивного навантаження перевищує активне в середньому в 1,5 рази (рис. 10. в). Зовсім інша картина спостерігається у разі аналізу струмів машин. Характер зміни струмів обох машин в залежності від несиметрії схожий. Вплив активно-індуктивного навантаження та активно-ємнісного навантаження відрізняється суттєво та для синхронного генератора досягає 4,8% в експерименті 4, а у разі асинхронної машини складає 3,2%.

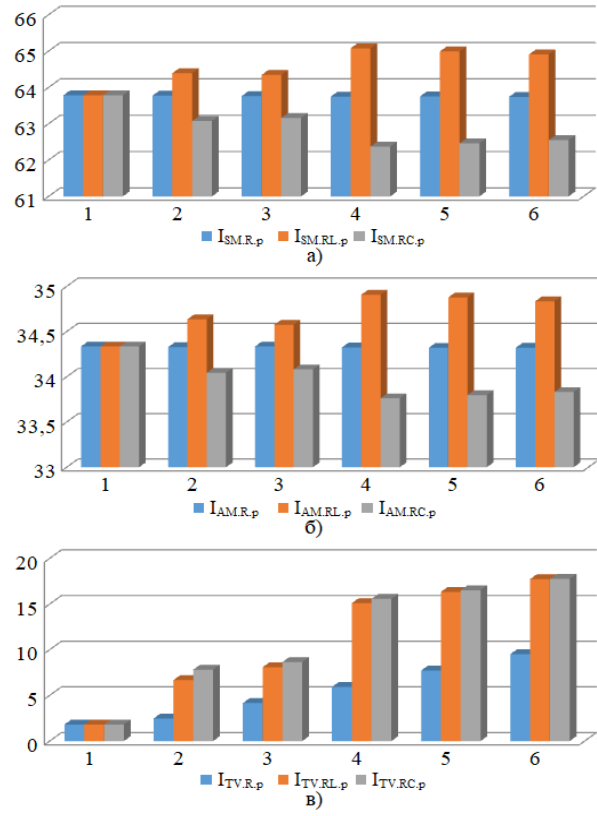


**Рисунок 9.** Порівняльні діаграми напруг гілки синхронного генератора між різними типами навантаження для: а) прямої послідовності; б) зворотної послідовності; в) нульової послідовності

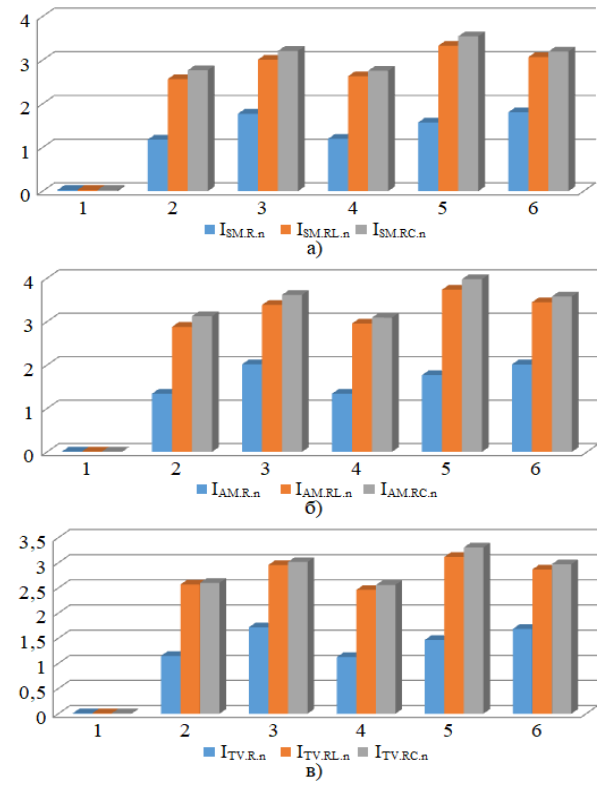
Струми нульової послідовності, які утворені несиметричним навантаженням, повністю замикаються на трансформатор (рис. 11). Протікаючи по обмотках трансформатора вони викликають відповідні напруги нульової послідовності (рис. 11. в.), як видно з рисунку 12 характер несиметричного навантаження суттєво впливає на значення цих струмів. Найбільша різниця спостерігається для 3 та 6 варіацій для яких відносно струму 5,43 А за умови активного навантаження, у разі активно індуктивного струм збільшується до 9,1 А, а у разі активно-емнісного до 9,82 А. На рисунку 12 наведені діаграми розподілу струму зворотної послідовності елементів схеми. Характер розподілу струмів зворотної послідовності для усіх елементів однаковий та відповідає діаграмам розподілу зворотної послідовності напруги.



**Рисунок 11.** Діаграми струму нульової послідовності вторинної обмотки трансформатора за умови різних типів навантаження.



**Рисунок 10.** Порівняльні діаграми струмів прямих послідовностей між різними типами навантаження в гілках: а) синхронного генератора; б) синхронного двигуна; в) зовнішньої мережі



**Рисунок 12.** Порівняльні діаграми струмів зворотної послідовностей: а) синхронного генератора; б) асинхронного двигуна; в) зовнішньої мережі

### V. ВИСНОВКИ

З використанням відомої структури побудовано модель мікромережі в якій шляхом введення несиметричного навантаження різного типу реалізовано серію експериментів з реєстрацією напруг та струмів прямої, зворотної та нульової послідовностей в гілках мережі.

За результатами аналізу отриманих в ході дослідження даних встановлено, що напруга прямої послідовності у разі зміни активного навантаження не змінює свого рівня, за тих же обставин у разі активно-ємнісного та активно-індуктивного навантаження зміна напруги має протилежний характер. У разі зростання несиметрії активно-індуктивного характеру напруга прямої послідовності знижується, а у разі активно-ємнісного збільшується. Зазначені зміни в деяких випадках перевищують 3%.

Струми прямої послідовності у разі небалансу активного навантаження відрізняються незначним чином. У разі прямої послідовності струму трансформатора спостерігається безперервне його зростання, яке у випадку активно-ємнісного, та активно індуктивного навантаження перевищує активне в середньому в 1,5 рази.

Струми зворотної послідовності в досліджуваній моделі, які утворені несиметричним навантаженням, повністю замикаються на трансформатор, викликаючи напруги нульової послідовності, а характер несиметричного навантаження суттєво впливає на значення цих струмів, відмічене зростання на 61%.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Олійниченко М., Бялобржеський О., Постіл А., Шокаръов Д., (2024). Аналіз факторів використання електричних джерел енергії в мікромережах з позиції системи енергоменеджменту. Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит 2024, 1 (191), с. 13-32. doi: 0.20998/2313-8890.2024.01.02.
- [2] Nasr-Azadani, E., Canizares, C., Olivares, Daniel Bhattacharya, Kankr. (2014). Stability Analysis of Unbalanced Distribution Systems With Synchronous Machine and DFIG Based Distributed Generators. Smart Grid, IEEE Transactions on. 5. 2326-2338. doi: 10.1109/TSG.2014.2321709..
- [3] Cao, Y, Wang, H., Chen, B. (2017). Unbalanced voltage control of virtual synchronous generator in isolated micro-grid. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 211. 012020. doi: 10.1088/1757-899X/211/1/012020.
- [4] Zheng, X., Wang, C. and Pang, S. (2019). Injecting positive-sequence current virtual synchronous generator control under unbalanced grid. IET Renewable Power Generation, 13: pp. 165-170. doi: 10.1049/iet-rpg.2018.5047
- [5] X. Wu, J. Mei, B. Wang, D. Liang, C. Qin and J. Zong. (2019). Unbalanced Loads Control Strategy for Virtual Synchronous Generator in Passive Network, IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia), Chengdu, China, pp. 2063-2068, doi: 10.1109/ISGT-Asia.2019.8881184.,
- [6] Dubey, M., A. S, Vijay., Doolla, Suryanarayana. (2023). A Non-linear Adaptive Virtual Impedance (NLAVI) based Approach for Sharing Asymmetrical Currents. doi: 10.1109/PEDES56012.2022.10080721.
- [7] Liu Y., Yi W., Xiaodong W. (2024). Independent Pitch Adaptive Control of Large Wind Turbines Using State Feedback and Disturbance Accommodating Control. Energies. 17, no. 18: pp. 4619. doi: 10.3390/en17184619.
- [8] Pana A., Alexandru B., Florin M-M., Cristian S., Andrei J., David S., (2024). Two-Way Power Flow Balancing in Three-Phase Three-Wire Networks by Unbalanced Capacitive Shunt Compensation Applied Sciences. 14, no. 9: pp. 3746. doi: 10.3390/app14093746.
- [9] Alathamneh M., Haneen G., Xingyu Y., Nelms R., (2022). Three-Phase Grid-Connected Inverter Power Control under Unbalanced Grid Conditions Using a Time-Domain Symmetrical Components Extraction Method. Energies 15, no. 19: pp, 6936. doi: 10.3390/en15196936
- [10] Ibrahim M., (2020). Optimization of Renewable Energy-Based Smart Micro-Grid System, pp. 12, doi: 10.5772/intechopen.87093.
- [11] Dufournet D., (2009). Circuit breakers go high voltage. IEEE Power Energy Magazine - IEEE POWER ENERGY MAG. 7. 34-40. doi: 10.1109/MPE.2008.930856.
- [12] Stephen M., Dean B., (2018). An Introduction to Symmetrical Components, System Modeling and Fault Calculation Bonneville Power Administration 35th Annual HANDS-ON Relay School March 12 - 16, 2018 Washington State University Pullman, Washington.
- [13] Adekitan, A.I., Ogunjuyigbe, A., Samuel, I., (2017). The performance of a 3-Phase Induction Machine under Unbalance Voltage Regime. Journal of Engineering Science and Technology Review. doi: 10.136-143. 10.25103/jestr.105.17.
- [14] Cociu V., Cociu L., Berzan. (2016). Symmetrical components expression of the stator current of an induction machine under internal fault, International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE), Iasi, Romania., pp. 267-271, doi: 10.1109/ICEPE.2016.7781345.

Стаття надійшла до редакції 03.10.2024

## RESEARCH OF THE DISTRIBUTION SYMMETRICAL COMPONENTS IN AN ELECTRICAL SYSTEM WITH A DIESEL GENERATOR AT AN UNSYMMETRICAL LOAD

- BIALOBRZHESKYI O.V.** D., Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electrical Engineering, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Kremenchuk, Ukraine, e-mail: bialobrzheski@ukr.net;
- OLIYNICHENKO M.Y.** PhD student at the Department of Electrical Engineering, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Kremenchuk,, Ukraine, e-mail: oliynichenko@kdu.edu.ua;
- VORONA V.V.** magister student at the Department of Electrical Engineering, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Kremenchuk,, Ukraine, e-mail: vvlaalvv@gmail.com.
- YAKIMETS S.M.** D., Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electrical Engineering, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Kremenchuk, Ukraine, e-mail: ysm\_seem@meta.ua

**Purpose.** Investigation symmetrical components of current and voltage in microgrid elements with an autonomous synchronous generator of limited power, which works in parallel with a network transformer under the condition of non-metric load.

**Methodology.** During the research, visual programming methods were used in the Simulink/Matlab package, methods of electrical engineering theory in terms of determining symmetrical component currents and voltages in observation branches, methods of synthesizing schemes for replacing elements of electric power systems for symmetrical component currents, methods of data processing and construction diagrams using specialized software tools.

**Findings.** As a result the analysis known studies, it was established that under the condition of researching low-power generating systems in conditions of asymmetry, insufficient attention is paid to the nature of the asymmetric load. Using the well-known structure of a microgrid, which includes a synchronous generator, a machine load, and an external network transformer, its model was built, in which, by introducing asymmetric loads of various types, a series of experiments was implemented with the registration of voltages and currents of forward, reverse, and zero sequences in the branches of the network. The analysis of the results obtained during the research established that the positive sequence voltage in the case of a change in the active load does not change its level, under the same circumstances, in the case of an active-capacitive and active-inductive load, the voltage change has the opposite character. In the case of increasing asymmetry of an active-inductive nature, the positive sequence voltage decreases, and in the case of an active-capacitive one, it increases. The specified changes in some cases exceed 3%. Positive sequence currents in the case of active load imbalance differ slightly. In the case of a positive sequence current of the transformer, its continuous growth is observed, which in the case of active-capacitive and active-inductive loads exceeds the active one by an average of 1.5 times. Negative sequence currents in the studied model, which are formed by an asymmetrical load, are completely closed to the transformer, causing zero-sequence voltages, and the nature asymmetrical load significantly affects the value of these currents, a 61% increase was noted.

**Originality.** It was established that in a microgrid, which includes a synchronous generator, a machine load, a symmetrical active load of comparable power to the generator, an external network transformer, in addition to the fact of asymmetry caused by an asymmetrical load, the character of an asymmetrical load (active, active-inductive or active-capacitive).

**Practical value.** In the case of using in microgrids devices that provide an increase in the quality of electrical energy, for example, symmetrical devices, it is necessary, in addition to the asymmetry factor, to take into account the natural load that causes the latter.

**Keywords:** asymmetrical load, symmetrical components, active-inductive load, active-capacitive load.

### REFERENCE

- [1] Olyinichenko M., Bialobrzheskyi O., Postil A., Shokarov D., (2024). Factors analysis use electrical energy sources in microgrids from energy management system position. Energy saving. Energy. Energy audit 2024, 1 (191), p. 13-32. doi: 0.20998/2313-8890.2024.01.02.
- [2] Nasr-Azadani, E., Canizares, C., Olivares, Daniel Bhattacharya, Kankr. (2014). Stability Analysis of Unbalanced Distribution Systems With Synchronous Machine and DFIG Based Distributed Generators. Smart Grid, IEEE Transactions on. 5. 2326-2338. doi: 10.1109/TSG.2014.2321709..
- [3] Cao, Y, Wang, H., Chen, B. (2017). Unbalanced voltage control of virtual synchronous generator in isolated micro-grid. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 211. 012020. doi: 10.1088/1757-899X/211/1/012020.

- [4] Zheng, X., Wang, C. and Pang, S. (2019). Injecting positive-sequence current virtual synchronous generator control under unbalanced grid. *IET Renewable Power Generation*, 13: pp. 165-170. doi: 10.1049/iet-rpg.2018.5047
- [5] X. Wu, J. Mei, B. Wang, D. Liang, C. Qin and J. Zong. (2019). Unbalanced Loads Control Strategy for Virtual Synchronous Generator in Passive Network, *IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia)*, Chengdu, China, pp. 2063-2068, doi: 10.1109/ISGT-Asia.2019.8881184.,
- [6] Dubey, M., A. S, Vijay,., Doolla, Suryanarayana. (2023). A Non-linear Adaptive Virtual Impedance (NLAVI) based Approach for Sharing Asymmetrical Currents. doi: 10.1109/PEDES56012.2022.10080721.
- [7] Liu Y., Yi W., Xiaodong W. (2024). Independent Pitch Adaptive Control of Large Wind Turbines Using State Feedback and Disturbance Accommodating Control. *Energies*. 17, no. 18: pp. 4619. doi: 10.3390/en17184619.
- [8] Pana A., Alexandru B., Florin M-M., Cristian S., Andrei J., David S., (2024). Two-Way Power Flow Balancing in Three-Phase Three-Wire Networks by Unbalanced Capacitive Shunt Compensation Applied Sciences. 14, no. 9: pp. 3746. doi: 10.3390/app14093746.
- [9] Alathamneh M., Haneen G., Xingyu Y., Nelms R., (2022). Three-Phase Grid-Connected Inverter Power Control under Unbalanced Grid Conditions Using a Time-Domain Symmetrical Components Extraction Method. *Energies* 15, no. 19: pp, 6936. doi: 10.3390/en15196936
- [10] Ibrahim M., (2020). Optimization of Renewable Energy-Based Smart Micro-Grid System, pp. 12, doi: 10.5772/intechopen.87093.
- [11] Dufournet D., (2009). Circuit breakers go high voltage. *IEEE Power Energy Magazine - IEEE POWER ENERGY MAG.* 7. 34-40. doi: 10.1109/MPE.2008.930856.
- [12] Stephen M., Dean B., (2018). An Introduction to Symmetrical Components, System Modeling and Fault Calculation Bonneville Power Administration 35th Annual HANDS-ON Relay School March 12 - 16, 2018 Washington State University Pullman, Washington.
- [13] Adekitan, A.I., Ogunjuyigbe, A., Samuel, I., (2017). The performance of a 3-Phase Induction Machine under Unbalance Voltage Regime. *Journal of Engineering Science and Technology Review*. doi: 10.136-143. 10.25103/jestr.105.17.
- [14] Cociu V., Cociu L., Berzan. (2016). Symmetrical components expression of the stator current of an induction machine under internal fault, *International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE)*, Iasi, Romania., pp. 267-271, doi: 10.1109/ICEPE.2016.7781345.