



*Науковий журнал*

# ЕЛЕКТРОТЕХНІКА та ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА

№3'2025

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

*Виходить 4 рази на рік*

Запоріжжя

2025

Головний редактор:

д-р техн. наук, професор,

**Тиховод Сергій Михайлович**

Заступник головного редактора:

канд. техн. наук, доцент,

**Коцур Михайло Ігорович**

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, Кардіффський університет, Кардіфф, Великобританія;

**Sebastian Tomy**, Ph.D, професор університету Торонто, м. Торонто, Канада, технічний експерт корпорації "Motor Drives and Control Group", Бей-Сіті, Мічиган, США;

**Arturi, Cesare Mario**, Ph.D., професор політехнічного університету Мілана, Італія;

**Ronseero-Clemente Carlos**, Ph.D., професор факультету Електроенергетика та електронні системи, Університет Естремадури, м. Бадахос, Іспанія;

**José Roberto Camacho**, PhD, професор електротехніки в Uberlandia федеральний університет, Бразилія;

**Mohamed Ahmed Moustafa Hassan**, Ph.D., професор кафедри електротехніки та електроенергетики, Каїрський університет, Гіза, Єгипет.

*Включено до переліку*

*наукових фахових видань України (категорія Б)*

*(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 національного політехнічного університету, м. Одеса, Україна; **Папайка Ю. А.**, д-р техн. наук, проф., Національний технічний університет "Дніпровська політехніка", м. Дніпро, 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; **Поляков М. О.**, д-р техн. наук, проф., 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, проф., 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, доцент 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 Recourse Index; Scientific Indexing Services (SIS); Ulrich's Periodicals Directory; WorldCat; Наукова періодика України – проект Національної бібліотеки України імені В. І. Вернадського (НБВУ).*

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 суб'єкта у сфері друкованих медіа:

Рішення Національної ради України з питань телебачення і радіомовлення No 3040 від 07.11.2024 року. Ідентифікатор медіа: R30-05581.

Реєстрація журналу:

Журнал зареєстровано у Міністерстві юстиції України. Свідоцтво про державну реєстрацію KB №24219-14059 ПР від 07.11.2019р.

Адреса редакції:

Редакційно-видавничий відділ. національний університет "Запорізька політехніка", вул. Університетська, 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 08.10.2025 за рекомендацією вченої ради Національного університету "Запорізька політехніка" (протокол №3 від 21.10.2025 р.). Формат 60x84/8. Ум. Др. Арк. 7,1. Тираж 300 прим. Зам. №895.

ZAPORIZHZHIA POLYTECHNIC NATIONAL UNIVERSITY

---



*Scientific journal*

**ELECTRICAL ENGINEERING  
&  
POWER ENGINEERING**

**№3'2025**

*Founded by Zaporizhzhia Polytechnic National University in May 1999*

*4 issues per year*

Zaporizhzhia

2025

*Editor-in-chief:*Prof., Sc.D. **Sergiy Tihovod***Associate Editor-in-chief:*Assoc. prof., Ph.D. **Mykhailo Kotsur***The journal has been included**scientific professional editions of Ukraine**(Order of the Ministry of Education and Science**№ 409 dated 17.03.2020,**Order of the Ministry of Education and Science**№ 1471 dated 26.11.2020)*

## FOREIGN MEMBERS OF EDITORIAL BOARD

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

## MEMBERS OF EDITORIAL BOARD (Ukraine)

**M.V. Zagirnyak**, Sc.D., prof., Kremenchuk Michaylo Ostrogradskiy National University; **S. E Zirka**, Sc.D., prof., Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro, Ukraine; **V. I. Milykh**, Sc.D., prof., National Technical University "KhPI", Kharkiv, Ukraine; **A. V. Zhyltsov**, 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; **Yu. A. Papaika**, Sc.D., prof., Dnipro University of Technology, Dnipro, 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; **M. O. Poliakov**, 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., assoc. prof., Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia, Ukraine.

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

Registration of an entity in the field of print media:

Decision of the National Council of Ukraine on Television and Radio Broadcasting No. 3040 of November 7, 2024. Media ID: R30-05581.

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. Universitets'ka, 64, Zaporozhia, 69063, Ukraine. Phone: +380(61)769-82-96 Fax: (061) 764-21-41 e-mail: rvv@zntu.edu.ua

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

Computer layout Dyachenko O.O. Editor of English texts Voitenko S.V. The journal was signed on October 08, 2025 on the recommendation of the academic council of the Zaporizhzhia Polytechnic National University (Protocol No.3 dated October 22, 2025). Sheet size 60x84/8. Cond. Print. Sheets 7,1. Number of copies printed 300. Rep. № 895.

# ЗМІСТ

## I ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

*Верещаго Є.М., Костюченко В.І., Джангіров М.В., Єременко А.П., Стогнієнко Є.В.*  
Синтез системи керування імпульсного джерела струму плазмової дуги.....7

*Любарський Б.Г., Кривошеєв С.Ю., Єресько О.В., Галиця В.І., Сакун О.В.,  
Любарський Д.Б.*  
Вплив напруги акумуляторної батареї на електромеханічні характеристики крокового приводу повороту платформи газодетонаційного міномету.....17

*Бородай В.А., Боровик Р.О., Нестерова О.Ю.*  
Узагальнені параметри системи збудження синхронного привода з ударним навантаженням.....25

## II ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА

*Смірнов Д.В., Данильченко Д.О.*  
Особливості проблеми моделювання розподіленої генерації в структурі електричних мереж за допомогою різних програмних комплексів.....38

*Папайка Ю.А., Лисенко О.Г., Малишко М.М., Удовик О.В.*  
Аналіз особливих режимів промислових електричних мереж з ізолюваною нейтраллю....44

*Цюпа В.М., Данильченко Д.О.*  
Можливості імплементації в релейному захисті алгоритму пошуку перед аварійних експлуатаційних умов шляхом використання нейронної мережі з підкріплюваним навчанням.....52

# CONTENTS

## I ELECTRICAL ENGINEERING

*Vereshchago Y.M., Kostiuchenko V.I., Dzhahnyrov M.V., Yeremenko A.P., Stohniienko Y.V.*  
Synthesis of a control system for a pulse current source of plasma ARC.....7

*Liubarskyi B., Kryvosheiev S., Eresko O., Halysia V., Sakun O., Liubarskyi D.*  
Influence of battery voltage on the electromechanical characteristics of the stepper drive for rotation of the platform of a gas detonation mortar.....17

*Borodai V.A., Borovyk R.O., Nesterova O.Yu.*  
Generalized parameters of the excitation system of a synchronous drive with impact load.....25

## II POWER ENGINEERING

*Smirnov D.V., Danylchenko D.O.*  
Specific features of modeling distributed generation within electrical network structures using different software packages.....38

*Papaika Yu.A., Lysenko O.G., Malyshko M.M., Udovyk O.V.*  
Analysis of special operating modes of industrial electrical networks with an isolated neutral.....44

*Tsiupa V.M., Danylchenko D.O.*  
Way to implementation in relay protection of the algorithm for searching for pre-fault operating conditions by using a neural network with backpropagation spot training.....52

## СИНТЕЗ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ІМПУЛЬСНОГО ДЖЕРЕЛА СТРУМУ ПЛАЗМОВОЇ ДУГИ

- ВЕРЕЩАГО Є.М.** канд. техн. наук, доцент, професор кафедри морського приладобудування Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна, e-mail: [venmkua@gmail.com](mailto:venmkua@gmail.com), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4370-7706>;
- КОСТЮЧЕНКО В.І.** канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри суднових електроенергетичних систем Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна, e-mail: [vitalii.kostiuchenko@nuos.edu.ua](mailto:vitalii.kostiuchenko@nuos.edu.ua), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2128-2388>;
- ДЖАНГИРОВ М.В.** аспірант кафедри морського приладобудування Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна, e-mail: [max.dzhangirov@gmail.com](mailto:max.dzhangirov@gmail.com), ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-1272-194X>;
- ЄРЕМЕНКО А.П.** старший викладач кафедри морського приладобудування Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна, e-mail: [andrii.yeremenko@nuos.edu.ua](mailto:andrii.yeremenko@nuos.edu.ua), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8392-7623>;
- СТОГНІЄНКО Є.В.** аспірант кафедри морського приладобудування Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна, e-mail: [yevhen.stohniienko@ukr.net](mailto:yevhen.stohniienko@ukr.net), ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-6769-8784>;

**Мета роботи.** Синтезувати аналітично астатичну цифрову систему стабілізації струму дуги плазмотрону за заданими прямими показниками якості та порядку астатизму. На основі неперервного прототипу в результаті вирішення задачі визначення бажаної передавальної функції замкненої системи. Крім заданого часу регулювання (одного з головних показників) необхідно забезпечити додаткові вимоги до якості в перехідних режимах.

**Методи дослідження.** Метод комп'ютерного моделювання, метод поділу – оптимальної фільтрації та оптимального детермінованого керування та методи налаштування регуляторів.

**Отримані результати.** Обґрунтовано лінеаризовану дискретну математичну модель імпульсного перетворювача; визначено узагальнені параметри цієї моделі. За цією моделлю розраховано, проаналізовано та представлено синтез регуляторів цифрової системи керування струмом плазмової дуги.

Цифрові системи мають більш високу технологічність і надійність. Однак завдання синтезу цифрових систем складніше порівняно з аналогічним завданням у безперервному випадку. Стаття присвячена розв'язанню задачі синтезу дискретної автоматичної системи стабілізації струму плазмової дуги, реалізація якої здійснюється на основі принципу керування виходом і впливом із заданими прямими показниками якості. Ефективність запропонованих методів ілюструється чисельними прикладами.

**Наукова новизна.** Перевагою розглянутого методу є те, що за допомогою його вдається усунути методичну помилку при синтезі астатичних цифрових систем, викликану дискретизацією бажаних функцій неперервних систем.

**Практична цінність.** Використання реалізованої процедури автоматизованого синтезу дозволяє: підвищити якість та продуктивність праці розробників на етапі ескізотехнічного проектування дискретних керуючих систем; прискорити та автоматизувати процес наукових досліджень цифрових керуючих систем. Подані в роботі результати використані під час проектування імпульсних джерел живлення з струмовим керуванням.

**Ключові слова:** ПІ-регулятор; цифрові системи керування; прямі показники якості; мікроконтролер; плазмова дуга; стабілізатор струму; джерело електроживлення.

### I. ВСТУП

Більшість пристроїв сучасної силової напівпровідникової техніки з погляду теорії автоматичного керування є дискретними нелінійними системами [1, 2]. Однак застосування пристроїв сучасної силової

електроніки (перетворювальної техніки) засноване на використанні «корисної» складової вихідних імпульсів, що змінюється в залежності від відносної тривалості імпульсів  $d$ . Крім корисної складової у вихідній напрузі (струмі) цих пристроїв містяться шкідливі,

але неминучі високочастотні пульсації. При досить високій частоті комутації в цих пристроях пульсації фазових координат, наприклад, імпульсних стабілізаторах струму (ІСС) виявляються зневажливо малими. Це дає підставу розглядати аналізовані реальні дискретні системи як безперервні, використовуючи їх граничну безперервну модель [1], [2], побудовану в припущенні нескінченної частоти комутації ( $T \rightarrow 0$ ) і відсутності пульсації фазових координат.

## II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Важливо підкреслити, що інтенсивний розвиток мікропроцесорів та мікроконтролерів, підвищення їх надійності та технологічності призводять до широкого поширення цифрових систем автоматичного керування (ЦСК) за практичної реалізації імпульсних перетворювачів. Ці системи забезпечують більш високу якість процесів керування, мають високу гнучкість і адаптованість до змін технологічних процесів, віддалену діагностику та налаштування параметрів роботи, швидкий цикл розробки, можливість оновлення програмного забезпечення в процесі експлуатації, що істотно підвищує економічну ефективність їх застосування [2-6].

Зауважимо, що в даний час в ЦСК в якості цифрових керуючих пристроїв (ЦКП) найчастіше використовуються мікроконтролери, в яких здійснюється перетворення сигналів (за допомогою АЦП і ЦАП), обчислення значень керуючого впливу за допомогою арифметико-логічного пристрою (АЛП) і зберігання даних [2]-[6]. Зазвичай під час вирішення завдання синтезу АЦП і ЦАП умовно відносять до об'єкта керування, у результаті утворюється дискретний об'єкт керування. Тому надалі під ЦКП розумітимемо АЛП та інші елементи, які реалізують закон керування.

Завдання синтезу ЦСК фактично полягає у визначенні алгоритму роботи цифрового керуючого пристрою (ЦКП), що реалізує знайдений закон керування. Для вирішення цього завдання застосовуються різні методи [2]-[6], але найбільш раціональними є методи аналітичного синтезу, що дозволяють отримати і структуру, і параметри закону керування шляхом вирішення деяких рівнянь.

Однією з основних причин, через які цифровий зворотний зв'язок не знайшов широкого застосування в імпульсних джерелах електроживлення плазмової дуги, є затримка, що вноситься в контур зворотного зв'язку (ЗЗ) операціями аналогово-цифрових перетворювачів (АЦП) цифрових широтно-імпульсних модуляторів (ЦШІМ). При цьому виникає додатковий фазовий зсув, який може досягати великих значень (десятки градусів) на частотах у 10 – 20 разів нижче за тактову частоту ШІМ.

## III. МЕТА РОБОТИ

Послідовне викладення етапів проєктування цифрового від'ємного ЗЗ у джерелах електроживлення плазмової дуги, включаючи синтез цифрового регуля-

тора, що забезпечує задану глибину від'ємного ЗЗ, заданий порядок астатизму та задані прямі показники якості при збереженні раціональних запасів стійкості по амплітуді та фазі.

## IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГУ МАТЕРІАЛУ І АНАЛІЗ ОТРИМАННИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Добре відомо, що ПІ-регулятор є найпоширенішим типом регулятора будь-яких процесів [7]. З розвитком нових методів регулювання, наприклад, таких як фазі-логіка або нейронні мережі, він не поступився своїм домінуючим положенням, оскільки є простим у налаштуванні і має зрозумілий для фахівців принцип роботи. У той самий час якщо для аналогового регулятора є чіткий алгоритм розрахунку параметрів для заданої структури об'єкта регулювання, то для його цифрового уявлення знайти у доступній літературі будь-якої суворої методики виявилось складно.

Нижче буде розглянуто питання синтезу параметрів ПІ-регулятора на прикладі джерела електроживлення плазмової дуги на основі транзисторного перетворювача з фазовим керуванням, що дозволяє реалізувати м'яке перемикання в мостовій схемі [8, 9]. Для представлених методик синтезу буде показано адекватність розглянутих методів для сучасних мікроконтролерів.

### ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТУ

У перетворювачах постійної напруги фазові координати  $i$ , отже, вихідні сигнали складаються з плавної складової та високочастотних пульсацій, викликаних ключовим режимом роботи транзисторів. При виборі досить високої частоти (щонайменше ніж на порядок вище частоти зрізу вихідного фільтра перетворювача) зміни структури системи та амплітуди пульсацій невеликі. Очевидно, що при зменшенні періоду комутації  $T$  ( $T \rightarrow 0$ ) та  $D = 2t_i / T = \text{const}$  режим, що встановився, наближається до граничного встановленого режиму, при якому відсутні пульсації фазових координат. Таку модель визначають як граничну безперервну модель. У більшості реальних випадків внаслідок високої частоти комутації пульсації фазових координат досить малі і відбуваються навколо фазових координат граничної безперервної моделі, що відповідає  $T \rightarrow 0$ . Зауважимо, що зміна відносної тривалості імпульсів  $\tilde{d}$  є не сигнальним, а параметричним збуренням [1].

Подання імпульсного перетворювача напруги постійного струму у вигляді безперервної моделі дозволяє досліджувати його властивості до створення фізичного зразка, вносити зміни в електричну схему, проводити синтез регуляторів та коригування їх параметрів  $i$ , відповідно, скорочувати термін його проєктування в цілому.

Перетворювач з фазовим керуванням, що дозволяє реалізувати м'яке перемикання в мостовій схемі, що працює на дугове навантаження для режиму малих сигналів може бути описаний моделлю виду (переда-



вальна функція (ПФ) «струм дуги – керування» [9, 10]

$$W_H(s) = W_{i/u}(s) = \frac{\tilde{I}(s)}{\tilde{U}(s)} = k_0 \exp(-T_\mu s) / (\tau s + 1), \quad (1)$$

де  $k_0 = (R_{dc} / (r_\Sigma + R_{дф0})) n_{TV} U_{вх} k_{ШМ} k_i$  – коефіцієнт посилення незмінної частини без урахування фактора пульсацій;  $\tau = L / (r_\Sigma + R_{дф0})$  – постійна часу ланцюга навантаження;  $T_\mu$  – час запізнення перетворювача, що визначаються на околиці номінального режиму;  $R_{дф0}$  – диференціальний опір плазмової дуги;  $L$  – сумарна індуктивність контуру;  $r_\Sigma$  у загальному випадку включає всі втрати у схемі в тому числі активний опір дроселя та внутрішній опір перетворювача [6], [7], причому опір втрат може залежати від частоти;  $R_{dc}$  – крутість датчика струму, що має розмірність опору;  $n_{TV}$ , як завжди,  $w_{21}/w_1 = w_{22}/w_1$ . У ПФ  $W_H(s)$  включаються коефіцієнти посилення силової частини, датчика та підсилювача сигналу датчика струму  $k_i$  та ШМ;  $k_{ШМ} \approx T/U_m$ , де  $U_m$  – амплітуда пили;  $T$  – період дискретизації.

Тут знак « $\sim$ » показує нескінченно малу зміну змінної щодо значення в періодичному режимі.

Часто якщо для моделі (1) виконується умова  $T_\mu / \tau \leq 1$ , то з нею може бути зіставлена модель

$$W_H(s) = k_0 / [(\tau s + 1)(T_\mu + 1)] \approx \frac{k_0}{(\tau s + 1)^l}, \quad (2)$$

де  $T_\mu = T_{ШМ} = 19,2 \cdot 10^{-6}$  с – постійна часу, що дорівнює періоду ШМ, що впливає з переходу

$$\lim_{l \rightarrow \infty} \frac{1}{(\tau s + 1)^l} = \lim_{l \rightarrow \infty} (T_\mu s / l + 1)^{-l} = \exp(-T_\mu s).$$

Перехід від однієї моделі до іншої можна виконати на основі наведених нижче даних:

$$\text{для } l = 2 \text{ із (2)} \rightarrow T_\mu / \tau = 0,1 \text{ по (1)}.$$

При побудові систем керування потрібна ідентифікація параметрів моделей (1) і (2), причому ідентифікація, наприклад, параметрів  $l$ ,  $k_0$ ,  $\tau$  моделі (2) дозволяє при необхідності перейти до моделі (1).

Оцінимо значення коефіцієнта посилення  $k_0$  та постійної часу  $\tau$  у перетворювачі [9, 10] при номінальних значеннях параметрів:  $R_{dc} = 75 \cdot 10^{-5}$  Ом;  $r_\Sigma = 0,01$  Ом;  $L = 300$  мкГн;  $U_{вх} = 540$  В – вхідна напруга регулятора, що відповідає обраному періодичному режиму, в околиці якого проводиться лінеаризація  $n_{TV} = 0,46$ ;  $U_m = 2,5$  В;  $k_i = 82$ ;  $f = 52$  кГц;  $R_{дф0} = 1,2$  Ом;  $D = 0,8$  – значення коефіцієнта заповнення в встановленому (періодичному) режимі. Тоді

$$k_0 = \frac{R_{dc} T n_{TV} U_{вх}}{(r_\Sigma + R_{дф0}) U_m} = \frac{75 \cdot 10^{-5} \cdot T \cdot 0,46 \cdot 540}{(0,01 + 1,2) \cdot 2,5} = 5,083 T ;$$

$$\tau = L / (r_\Sigma + R_{дф0}) = 248 \cdot 10^{-6} \text{ с}.$$

Один з відомих методів синтезу законів керування, що представляє особливий інтерес полягає у поданні силових ланцюгів стабілізаторів з ШМ в режимі малих відхилень адекватною амплітудно-імпульсною моделлю (АІМ) за регульованими складовими процесів.

Приведення широтно-імпульсного регулювання в околиці стаціонарного режиму до амплітудно-імпульсного дозволяє застосувати для аналізу та синтезу ІСС з ШМ добре розроблений апарат теорії систем з АІМ [1] та отримати на його основі імпульсні закони керування.

У цьому випадку під регульованими складовими процесу розуміють відхилення змінних ІСС від їх значень у стаціонарному режимі, зумовлені збільшенням поточної тривалості імпульсу  $t_{i,p}$  щодо стаціонарної тривалості  $t_{i,ст}$ .

Перехід від ШМ до АІМ першого роду здійснюється за умови рівності площ імпульсів [1]:

$$U_{вх} \tilde{d} T = \tilde{u}_{вх} D T.$$

Тоді закон зміни амплітуди імпульсів функції  $\tilde{d}$  наступний:  $\tilde{u}_{вх} = U_{вх} \tilde{d} / D$ . Він справедливий за умови незначних відхилень від  $D$  та частоті квантування, що у багато разів перевищує власну частоту фільтрів [1].

При цьому коефіцієнт передачі  $k_u = U_{вх} / D$  також відноситься до лінійної безперервної частини системи (входить до загального коефіцієнта передачі  $k_0$ ).

Для синтезу закону керування імпульсним регулятором (імпульсним перетворювачем струму – ІПС) з широтно-імпульсною модуляцією (ШМ) використовуємо адекватну амплітудно-імпульсну модель за регульованими складовими процесів ШМ, засновану на поділі процесу на стаціонарний і процес широтно-імпульсного регулювання.

Силовий ланцюг ІПС наведено в [8].

У цьому випадку дискретна ПФ незмінної частини (НЧ) системи, що синтезується [7]

$$W(z) = Z \left\{ \frac{W_0(s)}{s} \right\} - z^{-1} Z_\varepsilon \left\{ \frac{W_0(s)}{s} \right\},$$

де  $\varepsilon = 1 - D$ ;  $D = 2t_u / T$ ;  $T$  – період перемикаць;  $Z_\varepsilon$  – модифіковане  $z$ -перетворення.

Нехай НЧ системи має ПФ (1). Розглянемо випадок  $T_\mu = 0$ . Тоді згідно з (2) та додатком [7] отримуємо

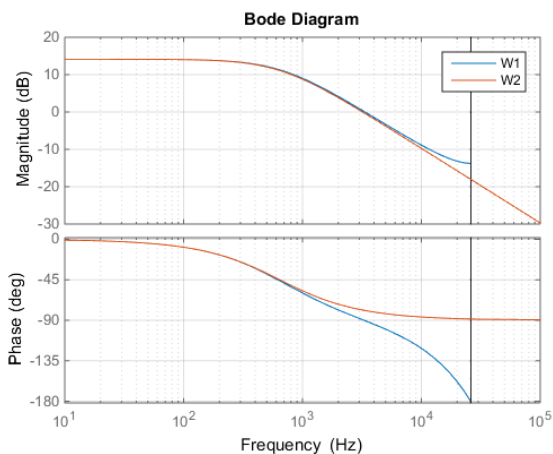
$$\begin{aligned} W(z) &= k_0 \left[ \frac{(1-d)z}{(z-1)(z-d)} - \frac{1}{z-1} - \frac{d^\varepsilon}{z-d} \right] = \\ &= k_0 \frac{d^\varepsilon - d}{z-d} = k_0 \frac{d(d^{-D} - 1)}{z-d}, \end{aligned} \quad (3)$$

де  $d = e^{-\alpha T}$ ;  $\alpha = \tau^{-1}$ .

Після підстановки числових значень маємо

$$W(z) = \frac{0,3901}{z - 0,9226}$$

Побудуємо за (1) та (3) частотні характеристики. Результати побудови наведено на рис. 1. Характеристики показують, що в дискретному варіанті без будь-якої частотної корекції і  $k_{PC} = 1$  в порівнянні з аналоговим фазова характеристика різко зменшується після частоти 1 кГц і на половині тактової частоти фазове відставання становить  $180^\circ$ . Таким чином, справжня фазова характеристика імпульсної системи в порівнянні з безперервною зазвичай дає песимістичну картину синтезу цифрової СК.



**Рисунок 1.** Частотні характеристики петльового посилення аналогового та цифрового перетворювача (частотна корекція відсутня)

**ПЕРЕОБЛАДНАННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ НА БАЗІ МІКРОЕОМ (МІКРОПРОЦЕСОРІВ)**

Замість виконання абсолютно нового проекту з використанням теорії цифрових систем керування можна застосувати методику переобладнання з урахуванням мікроЕОМ для створення еквівалентної цифрової системи [7]. Вважають, що цифрова система еквівалентна безперервній системі, якщо реакції двох систем для тих самих вхідних сигналів і початкових умов добре збігаються.

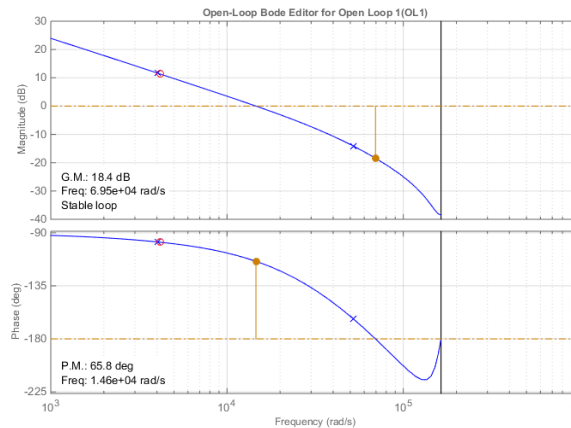
Прийемо частоту дискретизації, що дорівнює частоті комутації.

Для побудови дискретної передавальної функції (ДПФ) інтегрального каналу (переобладнання ПІ-регулятора) використовуємо метод інтегрування Ейлера (метод прямокутників), тобто. заміну  $s \leftarrow (z - 1) / T$ , що дає  $R_i(s) = \frac{k_i}{s} \rightarrow R_i(z) = \frac{k_i T}{z - 1}$ . При заданих чисельних значеннях  $k_p = 1,271$ ,  $k_i = 5123$  [9, 10], отриманих на основі бажаних (еталонних) ПФ розімкнутої системи та  $T = 19,2 \cdot 10^{-6}$  с отримуємо

$$R_{pi}(z) = \frac{k_p z - (k_p - k_i T)}{z - 1} =$$

$$= k_p \frac{z - (1 - (k_i / k_p) T)}{z - 1} = 1,271 \frac{z - 0,9226}{z - 1}$$

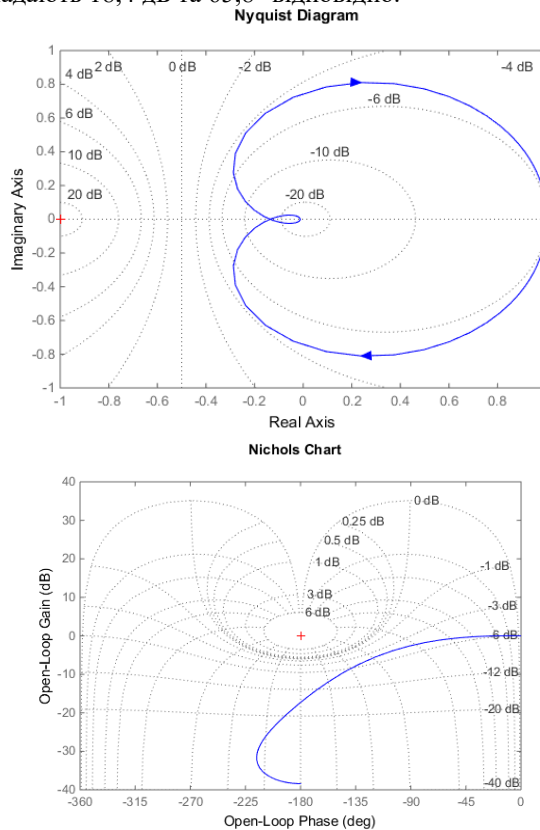
Логарифмічні частотні характеристики імпульсної системи з цифровим регулятором (розімкнутою скоригованою системою) при  $k_p = 1,271$  представлені на рис. 2.



**Рисунок 2.** Частотні характеристики дискретної системи керування струмом дуги

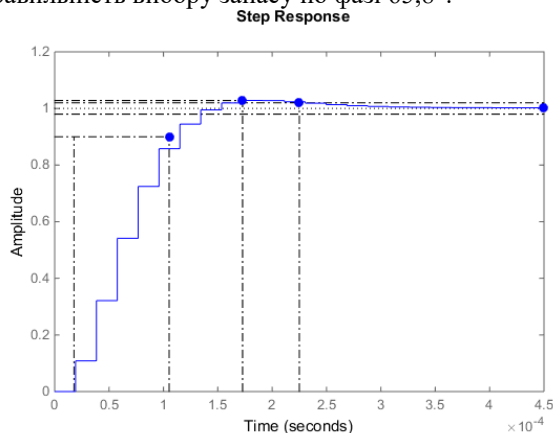
На рис. 3 зображені годографи Найквіста та Нікольса для цифрової системи керування струмом дуги.

Зауважимо, що запаси по модулю та фазі тепер складають 18,4 дБ та  $65,8^\circ$  відповідно.



**Рисунок 3.** Діаграми Найквіста та Нікольса

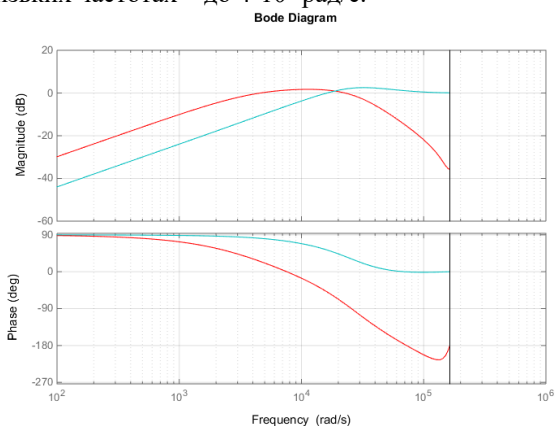
Перехідна характеристика системи зображена на рис. 4. Система приходиться у стан спокою за час, що дорівнює 9 – 10 періодам дискретності. Максимальне перерегулювання не перевищує 2 %, що підтверджує правильність вибору запасу по фазі  $65,8^\circ$ .



**Рисунок 4.** Реакція цифрової системи керування струмом дуги на ступінчасту зміну заданої точки

Для більшого запасу стійкості по фазі можна зменшити величину  $k_p$ , прийнявши, наприклад,  $k_p = 0,6355$ .

На рис. 5 показані графіки поведінки функції чутливості  $|S(j\omega)|$  та міри робастності  $|CS(j\omega)|$  системи керування струмом дуги. Видно, що зменшення чутливості та підвищення робастності досягається на низьких частотах – до  $4 \cdot 10^3$  рад/с.



**Рисунок 5.** Логарифмічні частотні характеристики функції чутливості та міри робастності системи керування струмом дуги

Зауважимо, що мале значення  $S(j\omega)$  досягається при великому динамічному коефіцієнті посилення ланцюга  $R(j\omega)W_d(j\omega)$  системи керування у відповідному діапазоні частот.

Для підвищення точності апроксимації можна використовувати складніші методи, наприклад, заміну

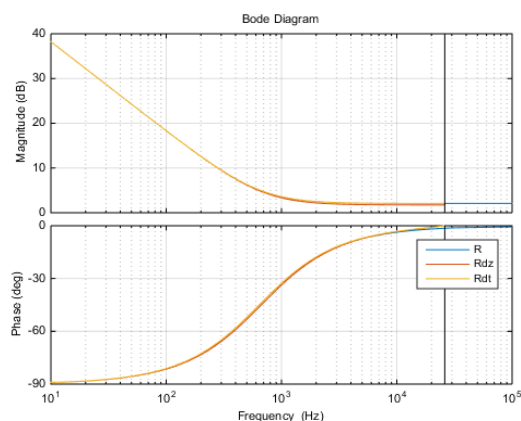
$$s \leftarrow \frac{2}{T} \frac{z-1}{z+1},$$

яка називається перетворенням Тастина, що відповідає інтегруванню за методом трапецій.

Така заміна дає

$$R_{PI}(z) = \left(k_p + \frac{k_I T}{2}\right) \frac{z - \frac{k_p - \frac{k_I T}{2}}{k_p + \frac{k_I T}{2}}}{z-1} = 1,3202 \cdot \frac{z - 0,9255}{z-1}.$$

Корисно обчислити частотні характеристики дискретних регуляторів для диграторів за різних чисельних способів інтегрування та зіставити їх із частотною характеристикою безперервного регулятора. Ці амплітудно-частотні та фазочастотні характеристики зображені на рис. 6. Вертикальна лінія відзначає частоту Найквіста  $\pi / T$ , де  $T, f = 1 / T$  – період та частота дискретизації. З цього рисунку видно, що їх амплітудні та фазові характеристики практично збігаються. Тому для отримання передавальної функції регулятора застосування складніших способів інтегрування роботи не будемо.



**Рисунок 6.** Частотні характеристики безперервного  $R$  та дискретних ПІ-регуляторів  $Rdz$  (зберігання нульового порядку),  $Rdt$  (Тастін)

### СИНТЕЗ ЦСК З КІНЦЕВОЮ ТРИВАЛІСТЮ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ

Нехай послідовний цифровий регулятор об'єкта регулювання [9, 10] має передавальну функцію

$$\begin{aligned} R(z) &= \frac{1}{k_0(1-e^{-T/\tau})} z - \frac{e^{-T/\tau}}{k_0(1-e^{-T/\tau})} = \\ &= \frac{z-d}{k_0(z-1)(1-d)} = A \frac{1-dz^{-1}}{1-z^{-1}}. \end{aligned} \quad (4)$$

Тоді ПФ розімкнутої системи з корекцією набуває простого вигляду:

$$W^*(z) = R(z)W_H(z) = \frac{1}{z-1}.$$

Відповідна їй ПФ замкнутої системи

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

Це означає, що при ступінчастому вхідному впливі вихідний сигнал системи  $i(nT)$  досягає необхідного значення за один період квантування і з цього моменту зберігає дане значення. Перерегулювання  $i(nT)$  дорівнює нулю. Дійсна реакція  $i(t)$  може супроводжуватися пульсаціями у проміжках між моментами замикання. Такий тип реакції прийнято називати аперіодичним перехідним процесом [7].

Визначимо запас стійкості за модулем і фазою імпульсної системи регулювання. Для цього розглянемо характеристичне рівняння замкнутої системи

$$z - 1 + B = 0.$$

Умова стійкості

$$0 < B < 2.$$

Тому запас стійкості за модулем дорівнює 6 дБ.

Перейдемо до частотної ПФ розімкнутої системи підстановкою  $z = e^{j\omega T}$

$$W(e^{j\omega T}) = \frac{1}{e^{j\omega T} - 1} = \frac{1}{\cos \omega T - 1 + j \sin \omega T}.$$

Визначимо частоту зрізу для ПФ (4) з рівності

$$\left| \frac{1}{e^{j\omega_{зр} T} - 1} \right| = 1,$$

звідки

$$\omega_{зр} = \pi/3T,$$

$$\arg W(j\omega_{зр}) = \arg \frac{1}{e^{j\pi/3} - 1} = -\frac{2\pi}{3} = -120^\circ.$$

Таким чином, запас стійкості по фазі дорівнюватиме  $60^\circ$ .

При  $T = 19,2$  мкс та параметрах [9, 10] дискретний фільтр або цифровий обчислювальний пристрій (ЦОП) має ПФ

$$R(z) = 2,542 \frac{z - 0,9226}{z - 1}.$$

З отриманого виразу видно, що дискретний фільтр дуже схожий на ПІ-регулятор [9, 10]. Відмінність спостерігається лише у коефіцієнтах. Пропорційний коефіцієнт

$$k_P = \frac{1}{k_0(1 - e^{-T/\tau})} = \frac{1}{k_0(1 - d)} = \frac{1}{5,082(1 - 0,9226)} = 2,542,$$

а інтегральний

$$k_I = \frac{k_P - \frac{e^{-T/\tau}}{k_0(1 - e^{-T/\tau})}}{T} = \frac{k_P - \frac{d}{k_0(1 - d)}}{T} =$$

$$= \frac{2,542 - \frac{0,9226}{5,082 \cdot (1 - 0,9226)}}{19,2 \cdot 10^{-6}} = 10208,$$

що у 2 рази більше розрахованих класичним методом.

Якщо коефіцієнт передачі безперервної частини вибрати так, щоб  $A = 1$ , або  $k_0 = (1 - d)^{-1}$ , то вираз (4) спроститься

$$R(z) = \frac{1 - dz^{-1}}{1 - z^{-1}}.$$

Звідси програма роботи ЦОП

$$x_0[n] = e_0[n] - de_0[n - 1] + x_0[n - 1],$$

де  $e_0[n]$  і  $x_0[n]$  – вхідна і вихідна гратчасті функції ЦОП, причому  $e_0[n] = g_0[n] - i_0[n]$ , а  $g_0$  і  $i_0$  – цифрові уявлення задаючого впливу і керованої величини відповідно.

Як другий приклад знайдемо ПФ дискретного коректора з умови реалізації заданої передавальної функції

$$\Phi^*(z) = \frac{0,5z + 0,5}{z^2} = 0,5z^{-1} + 0,5z^{-2}. \quad (5)$$

Шукана ДПФ ЦОП  $R(z)$  дорівнює

$$R(z) = \frac{Q(z)}{P(z)} \cdot \frac{\Phi^*(z)}{1 - \Phi^*(z)},$$

де  $P(z) = k_0(1 - d)$ ;  $Q(z) = z - d$  [6, 7].

Степені багаточленів  $P(z)$  та  $Q(z)$  рівні відповідно  $n_P = 0$ ;  $n_Q = 1$ . Мінімальна тривалість процесу в замкнутій імпульсній системі, як відомо, визначається добутком періоду повторення на суму числа нулів та полюсів незмінної частини системи  $\bar{n} = n_P + n_Q + 1$ .

У цьому випадку матимемо

$$R(z) = \frac{U(z)}{E(z)} = \frac{0,5k_0}{1 - d} \cdot \frac{z^2 - (d - 1)z - d}{z^2 - 0,5z - 0,5}.$$

Отже, рівняння дискретного коректора у зображеннях буде

$$(1 - d)(z^2 - 0,5z - 0,5)U(z) = 0,5k_0[z^2 - (d - 1)z - d]E(z)$$

або в оригіналах

$$(1 - d)[u(n + 2) - 0,5u(n + 1) - 0,5u(n)] = 0,5k_0[e(n + 2) - (d - 1)e(n + 1) - de(n)]. \quad (6)$$

Таким чином, для прикладу, що розглядається, закон керування являє собою різницеве рівняння (6) другого порядку. Можна переконатися, що вихідна змінна  $i(n)$  замкнутої системи із знайденим дискретним коректором збігається за  $n = 1, 2, \dots$  з призначе-

ною траєкторією  $i^*(n)$ , яка є вихідною змінною ета-лонною системою з ПФ (5).

Слід зазначити, що ПФ  $\Phi^*(z)$  у розглянутому прикладі також відповідає процесу кінцевої тривалості: перехідний процес відпрацювання одиничної функції закінчується за два такти.

На рис. 7 наведено перехідну функцію системи з ПФ [9, 10], побудовану за допомогою *MATLAB* при  $T = 19,2 \cdot 10^{-6}$  с [11].

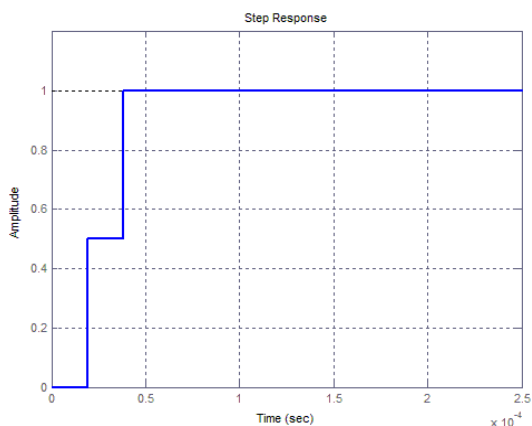


Рисунок 7. Перехідна функція цифрової системи без перерегулювання

На основі рис. 7 неважко зробити висновок, що запізнення дорівнює  $T$ , перерегулювання  $\sigma = 0$ , перехідний процес триває рівно  $3,84 \cdot 10^{-5}$  с, а статична помилка, незважаючи на наявність запізнення, дорівнює нулю.

**ВИМІРЮВАННЯ СТРУМУ У СКЛАДІ ЦИФРОВОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ**

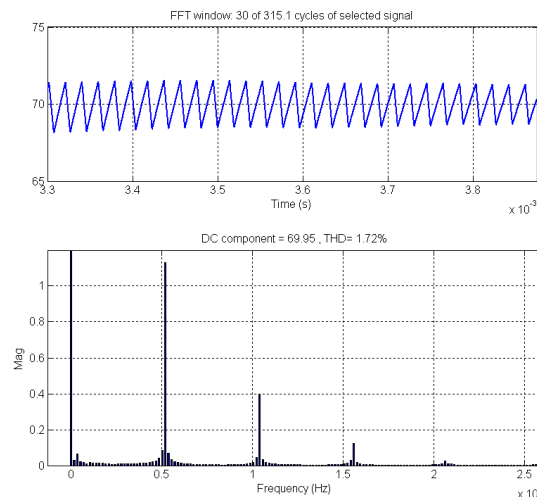
За допомогою АЦП мікроконтролера проводиться вимірювання аналогового сигналу (струму) кілька разів за період ШІМ. При цьому компенсується більша частина перешкод (систематичних та псевдовипадкових). Багаторазове знімання даних АЦП з подальшим усередненням дозволяє підвищити і точність перетворення («oversampling»). Відомо, що, наприклад, збільшення кількості вибірок каналом в 2 рази додає половину розряду до паспортної розрядності АЦП. Мінімально за період ШІМ рекомендується виконувати два знімання даних з кожного каналу АЦП. Найкращі ж показники виходять при 4-8-кратному перетворенні за період та усередненні.

Систематичні перешкоди практично зводяться до нуля з використанням усереднення кількома вибірками. Отже, застосовувати фільтри з постійною часу більше періоду ШІМ немає необхідності.

Зауважимо, що в датчиках систем керування, де важливо мати мінімальний час знімання інформації, доцільно використовувати фільтри Баттерворта (час загасання перехідного процесу для поліномів Чебишева більше, ніж поліномів Баттерворта) з нулем на частоті субгармонік. Введення в ПФ нулів, що відпо-

відають частотам субгармонік, крім основного завдання придушення цих субгармонік, зменшує час перехідного процесу, усуває викиди вихідного сигналу та підвищує точність контролю.

Часова діаграма вихідного струму (струму дуги) перетворювача та його амплітудний спектр, отриманий за результатами розрахунку (спектрального аналізу) наведено на рис. 8.



|   |                 |      |
|---|-----------------|------|
| Sampling time = 7.3904e-008 s           | 26000 Hz        | 0.01 |
| Samples per cycle = 260.213             | 2.77333e+004 Hz | 0.01 |
| DC component = 69.95                    | 2.94666e+004 Hz | 0.01 |
| Total Harmonic Distortion (THD) = 1.72% | 31200 Hz        | 0.01 |
|   | 3.29333e+004 Hz | 0.01 |
|   | 3.46666e+004 Hz | 0.01 |
|   | 3.64000 Hz      | 0.01 |
|   | 3.81333e+004 Hz | 0.01 |
|   | 3.98666e+004 Hz | 0.01 |
|   | 4.16000 Hz      | 0.01 |
|   | 4.33333e+004 Hz | 0.02 |
|   | 4.50666e+004 Hz | 0.02 |
|   | 4.68000 Hz      | 0.03 |
|   | 4.85333e+004 Hz | 0.04 |
|   | 5.02666e+004 Hz | 0.08 |
|   | 5.20000 Hz Fund | 1.13 |
|   | 5.37333e+004 Hz | 0.07 |
|   | 5.54666e+004 Hz | 0.03 |
|   | 5.72000 Hz      | 0.02 |
|   | 5.89333e+004 Hz | 0.02 |
|   | 6.06666e+004 Hz | 0.01 |
|   | 6.24000 Hz      | 0.01 |
|   | 6.41333e+004 Hz | 0.01 |
|   | 6.58666e+004 Hz | 0.01 |
|   | 6.76000 Hz      | 0.01 |
|   | 6.93333e+004 Hz | 0.01 |
|   | 7.10666e+004 Hz | 0.01 |
|   | 7.28000 Hz      | 0.00 |
|   | 7.45333e+004 Hz | 0.01 |
|   | 7.62666e+004 Hz | 0.00 |
|   | 7.80000 Hz      | 0.00 |
|   | 7.97333e+004 Hz | 0.00 |
|   | 8.14666e+004 Hz | 0.00 |
|   | 8.32000 Hz      | 0.00 |
|   | 8.49333e+004 Hz | 0.00 |
|   | 8.66666e+004 Hz | 0.00 |
|   | 8.84000 Hz      | 0.00 |
|   | 9.01333e+004 Hz | 0.00 |
|   | 9.18666e+004 Hz | 0.01 |
|   | 9.36000 Hz      | 0.01 |
|   | 9.53333e+004 Hz | 0.01 |
|   | 9.70666e+004 Hz | 0.01 |
|   | 9.88000 Hz      | 0.01 |
|   | 1.00533e+005 Hz | 0.02 |
|   | 1.02266e+005 Hz | 0.04 |
|   | 104000 Hz (h2)  | 0.40 |
|   | 1.05733e+005 Hz | 0.03 |
|   | 1.07466e+005 Hz | 0.02 |
|   | 109200 Hz       | 0.01 |
|   | 1.10933e+005 Hz | 0.01 |
|   | 1.12666e+005 Hz | 0.01 |
|   | 114400 Hz       | 0.01 |
|   | 1.16133e+005 Hz | 0.01 |
|   | 1.17866e+005 Hz | 0.01 |
|   | 119600 Hz       | 0.01 |
|   | 1.21333e+005 Hz | 0.00 |
|   | 1.23066e+005 Hz | 0.00 |
|   | 124800 Hz       | 0.00 |
|   | 1.26533e+005 Hz | 0.00 |
|   | 1.28266e+005 Hz | 0.00 |
|   | 130000 Hz       | 0.00 |
|   | 1.31733e+005 Hz | 0.00 |
|   | 1.33466e+005 Hz | 0.00 |
|   | 135200 Hz       | 0.00 |
|   | 1.36933e+005 Hz | 0.00 |
|   | 1.38666e+005 Hz | 0.00 |
|   | 140400 Hz       | 0.00 |
|   | 1.42133e+005 Hz | 0.00 |
|   | 1.43866e+005 Hz | 0.00 |
|   | 145600 Hz       | 0.00 |
|   | 1.47333e+005 Hz | 0.01 |
|   | 1.49066e+005 Hz | 0.01 |
|   | 150800 Hz       | 0.01 |
|   | 1.52533e+005 Hz | 0.01 |
|   | 1.54266e+005 Hz | 0.03 |
|   | 156000 Hz (h3)  | 0.12 |
|   | 1.57733e+005 Hz | 0.02 |
|   | 1.59466e+005 Hz | 0.01 |
|   | 161200 Hz       | 0.01 |
|   | 1.62933e+005 Hz | 0.01 |
|   | 1.64666e+005 Hz | 0.00 |
|   | 166400 Hz       | 0.00 |
|   | 1.68133e+005 Hz | 0.00 |
|   | 1.69866e+005 Hz | 0.00 |
|   | 171600 Hz       | 0.00 |

Рисунок 8. Часова діаграма струму навантаження перетворювача (дуги) та його розрахункова спектрограма

Як приклад на рис. 9, 10 показані діаграми Бодє та перехідні функції для режкторного (*Notch*) фільтра датчика струму з нульовим коефіцієнтом передачі на частоті 52 кГц. Нижче розглядається *Notch*-фільтр, реалізація дискретизації та поведінки його у часовій області.

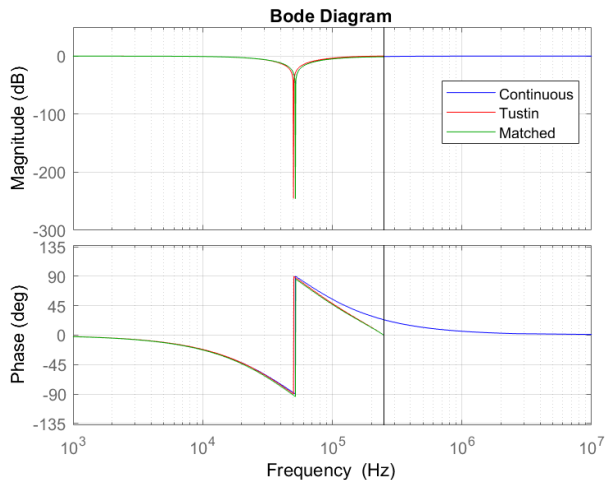


Рисунок 9. Перетворення моделі з безперервної на дискретну форму (дискретизація *Notch*-фільтра)

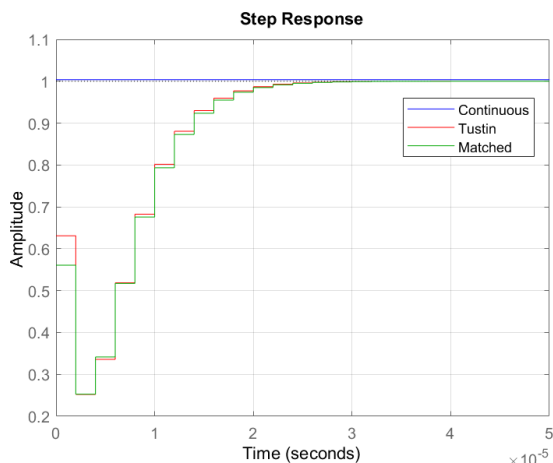


Рисунок 10. Перехідні характеристики безперервної системи та дискретних моделей

Порівняння частотних і перехідних характеристик вихідної безперервної моделі *Notch*-фільтра та кількох дискретних моделей у порівнянні з результатом *ZOH* забезпечують хорошу якість апроксимації.

## V. ВИСНОВКИ

1. Розроблено модель перетворювача та запропоновано спосіб реалізації та методику розрахунку цифрових регуляторів у складі систем електроживлення плазмотрона.

2. Розглянуті методи дозволяють синтезувати ЦСК з кінцевою тривалістю перехідних процесів і з постійним перерегулюванням, а також можна застосувати останні для керування об'єктами як без запі-

знення, так і із запізненням.

3. Використання реалізованих процедур синтезу дозволяє: підвищити якість та продуктивність праці інженерів-розробників на етапі ескізно-технічного проектування дискретних керуючих систем; прискорити та автоматизувати процес наукових досліджень та синтезу цифрових керуючих систем при різному поєднанні необхідних показників якості. Безумовно забезпечується стійкість системи і грубість за параметрами, що варіюються.

4. Деякі алгоритми цифрового керування були успішно застосовані у системі автоматичного керування струмом дуги плазмотрона.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Billings Keith and Taylor Morey. Switchmode Power Supply Handbook. 3rd ed. New York: McGraw-Hill Education. 2011. 1020 p.
- [2] Денисов Ю.А. Стабилизаторы постоянного напряжения с широтно-импульсными и частотно-импульсными квазирезонансными преобразователями / Ю.А. Денисов. – К.: Ин-т электродинамики НАН Украины, 2001. – 146 с.
- [3] Isaak Mayergoyz, Siddharth Tyagi. Pulse Width Modulation in Power Electronics. World Scientific Publishing Company. 2021. 420 p.
- [4] Гостев В.И. Системы автоматического управления цифровыми регуляторами: Справочник. / В.И. Гостев, В.К. Стеклов. – Київ: Радиоаматор, 1998. – 704 с.
- [5] Olsson G., Piani G. Computer Systems for Automation and Control. Prentice-Hall international series in systems and control engineering. Prentice-Hall. 1992. 428 p.
- [6] Гостев В.И. Синтез цифровых регуляторов систем автоматического управления / В.И. Гостев, Д.А. Ходолий, А.А. Баранов. – Киев: Техника, 2000. – 575 с.
- [7] Isermann R. Digital Control Systems. Springer-Verlag, 1981, 566 p.
- [8] Modeling of Soft Switching Bridge Converter. / Y. Vereshchago, V. Kostiuhenko, Y. Stohniienko, A. Yeremenko, O Kyrychenko, O. Melnyk // 2024 IEEE 5th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek). P.318-323. <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek61434.2024.10878069>
- [9] Аналіз перетворювача постійного струму, що працює на плазмову дугу. / С.М. Верещаго, В.І. Костюченко, С.М. Новогрецький // Електротехніка і електромеханіка, 2023, №5, 31–36. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2023.5.05>
- [10] Керування динамікою імпульсного перетворювача з м'яким перемиканням, що працює на дугове навантаження / С.М. Верещаго, В.І. Костюченко, С.В. Стогнієнко, А.Ю. Грешнов // Технічна елек-

тродинаміка.– 2024. – № 6. – С. 21 – 30.  
<https://doi.org/10.15407/techned2024.06.021>

Надійшла (Received) 23.06.2025;

Прийнята (Accepted) 05.08.2025;

Опублікована (Published) 22.10.2025;

[11]Tewari A. Modern Control Design With MATLAB and SIMULINK / A. Tewari. – John Wiley and Sons Ltd, 2022. 503 p.

## SYNTHESIS OF A CONTROL SYSTEM FOR A PULSE CURRENT SOURCE OF PLASMA ARC

- VERESHCHAGO Y.M. PhD, Professor of the Department of Marine Instrument, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: [venmkua@gmail.com](mailto:venmkua@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4370-7706>;
- 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), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2128-2388>;
- DZHANYROV M.V. PhD student of Department of Marine Instrument, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: [max.dzhangirov@gmail.com](mailto:max.dzhangirov@gmail.com), ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-1272-194X>;
- YEREMENKO A.P. Senior lecturer of the Department of Marine Instruments of Admiral Makarov National Shipbuilding University, Mykolayiv, Ukraine, e-mail: [andrii.yeremenko@nuos.edu.ua](mailto:andrii.yeremenko@nuos.edu.ua), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8392-7623>;
- STOHNIIENKO Y.V. PhD student of Department of Marine Instrument, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: [yevhen.stohniienko@ukr.net](mailto:yevhen.stohniienko@ukr.net), ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-6769-8784>;

**Purpose.** To synthesize analytically astatic digital system for stabilizing the plasmatron arc current according to the given direct indicators of quality and order of astaticism. Based on a continuous prototype as a result of solving the problem of determining the desired transfer function of a closed system. In addition to the given regulation time (one of the main indicators), it is necessary to provide additional requirements for quality in transient modes.

**Methodology.** Computer simulation method, separation method – optimal filtering and optimal deterministic control and methods for adjusting regulators.

**Findings.** A linearized discrete mathematical model of a pulse converter is substantiated; the generalized parameters of this model are determined. According to this model, the synthesis of regulators of a digital plasma arc current control system is calculated, analyzed and presented.

Digital systems have higher manufacturability and reliability. However, the task of synthesizing digital systems is more difficult compared to a similar task in the continuous case. The article is devoted to solving the problem of synthesizing a discrete automatic plasma arc current stabilization system, the implementation of which is carried out on the basis of the principle of output and influence control with specified direct quality indicators. The effectiveness of the proposed methods is illustrated by quantitative examples.

**Originality.** The advantage of the considered method is that it can eliminate the methodological error in the synthesis of astatic digital systems caused by the discretization of the desired functions of continuous systems.

**Practical value.** The use of the implemented automated synthesis procedure allows: to increase the quality and productivity of developers at the stage of technical design of discrete control systems; to accelerate and automate the process of scientific research of digital control systems. The results presented in the work were used in the design of switching power supplies with current control.

**Keywords:** PI controller; digital control systems; direct quality indicators; microcontroller; plasma arc; current stabilizer; power supply.

### REFERENCES

- [1] Billings Keith and Taylor Morey. (2011). Switchmode Power Supply Handbook. 3rd ed. New York: McGraw-Hill Education. 1020.
- [2] Denisov Ju.A. (2001). Stabilizatory postojannogo naprjazhenija s shirotno-impul'snymi i chastotno-impul'snymi kvazirezonansnymi preobrazovateljami. K.: In-t jelektrodinamiki NAN Ukrainy, 146.
- [3] Isaak Mayergoyz, Siddharth Tyagi. (2021). Pulse Width Modulation in Power Electronics. World Scientific Publishing Company. 420.
- [4] Gostev V.I., Steklov V.K.. (1998). Sistemy

- avtomaticheskogo upravlennja cifrovymi reguljatorami: Spravochnik. Kyi'v: Radioamator, 704.
- [5] Olsson G., Piani G. (1992). Computer Systems for Automation and Control. Prentice-Hall international series in systems and control engineering. Prentice-Hall. 428.
- [6] Gostev V.I., Hodolij D.A., Baranov A.A. (2000). Sintez cifrovih reguljatorov sistem avtomaticheskogo upravlennja. Kiev: Tehnika, 575.
- [7] Isermann R. (1981). Digital Control Systems. Springer-Verlag, 566.
- [8] Vereshchago Y., Kostiuchenko V., Stohnienko Y., Yeremenko A., Kyrychenko O, Melnyk O. (2024). Modeling of Soft Switching Bridge Converter. 2024 IEEE 5th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek). 318-323.
- <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek61434.2024.10878069>
- [9] Vereshhago Je.M., Kostjuchenko V.I., Novogrec'kyj S.M. (2023). Analiz peretvorjuvacha postijnogo strumu, shho pracjuje na plazmovu dugu. *Electrical engineering and electromechanics*, 5, 31–36. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2023.5.05>
- [10] Vereshhago Je.M., Kostjuchenko V.I., Stognijenko Je.V., Grjeshnov A.Ju.. (2024). Keruvannja dynamikoju impul'snogo peretvorjuvacha z m'jakym peremykannjam, shho pracjuje na dugove navantazhennja. *Technical electrodynamics*. 6. 21 – 30. <https://doi.org/10.15407/techned2024.06.021>
- [11] Tewari A. (2022). Modern Control Design With MATLAB and SIMULINK. John Wiley and Sons Ltd, 503.



## ВПЛИВ НАПРУГИ АКУМУЛЯТОРНОЇ БАТАРЕЇ НА ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ КРОКОВОГО ПРИВОДУ ПОВОРОТУ ПЛАТФОРМИ ГАЗОДЕТОНАЦІЙНОГО МІНОМЕТУ

- ЛЮБАРСЬКИЙ Б.Г.** д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри електричного транспорту та тепловозобудування Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2985-7345>, e-mail: lboris1911@ukr.net;
- КРИВОШЕЄВ С.Ю.** канд. техн. наук, доцент, завідувач кафедри промислової і біомедичної електроніки Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8771-2961>, e-mail: Serhii.Kryvosheiev@khpі.edu.ua;
- ЄРЕСЬКО О.В.** канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри промислової і біомедичної електроніки Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3521-5314>, e-mail: oleksandr.eresko@khpі.edu.ua;
- ГАЛИЦЯ В.І.** канд. техн. наук, доцент кафедри фізичного виховання Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3521-5314>, e-mail: vitaliy.galitsa@gmail.com;
- САКУН О.В.** д-р техн. наук, завідувач кафедри військової підготовки Військового інституту танкових військ Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2964-071X>, e-mail: sakunav71@gmail.com;
- ЛЮБАРСЬКИЙ Д.Б.** інженер кафедри промислової і біомедичної електроніки Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3535-9809>, e-mail: dizas005@ukr.net.

**Мета роботи.** Визначити залежності впливу напруги акумуляторної батареї, що обумовлює рівень її заряду на максимальні та вібраційні моменти, а також діюче значення струму фази двигуна, які ідентифікують ефективність роботи приводу повороту платформи газодетонаційного міномету.

**Методи дослідження.** Метод імітаційного моделювання.

**Отримані результати.** розроблено імітаційну модель крокового приводу, особливістю якої є врахування конструктивних параметрів навантаження, крокового двигуна та напівпровідникового перетворювача, параметрів системи керування та крокового двигуна; проведено комплекс чисельних експериментів на імітаційній моделі для визначення впливу рівня напруги акумуляторної батареї та струму уставки на діючий струм фази двигуна, його вібраційний та максимальний моменти; визначено, що керування струмом уставки може призвести до стабілізації режимів роботи приводу повороту платформи газодетонаційного міномету при розряді акумулятора живлення та зниженні його напруги. Визначено, що діюче значення струму фази має змінний характер. Зміна діючого значення струму від струму уставки збільшується при збільшенні напруги живлення від 2,41 А до 3,23 А при нарузі акумуляторної батареї 27 В. При низьких значеннях напруги вплив струму уставки на діюче значення струму фази двигуна незначний від 1,52А до 1,58 А. При збільшенні напруги акумуляторної батареї з 22 В до 27 В при усіх значеннях струму уставки спостерігається монотонне збільшення діючого струму фази. Рівень вібраційного моменту на валу двигуна значно зростає при збільшенні напруги батареї. Струм уставки зменшує рівень вібрацій, однак це зниження ефективно лише при напругах акумулятора від 26В до 27В. Визначено, що при високих значеннях напруги акумулятора та високих значеннях струму уставки спостерігається значне зростання максимальних пускових моментів. Тому при пуску приводу рекомендоване примусове зменшення струму уставки до рівня 4,5 А.

**Наукова новизна.** Вперше визначено залежності діючих значень струмів фаз та рівня вібраційних, максимальних моментів крокового приводу для повороту платформи газодетонаційного міномету від напруги акумуляторної батареї живлення, що можливо застосувати при створенні системи автоматизованого керування.

**Практична цінність.** Отримані результати досліджень можливо використати на практиці при створен-

*ні автоматизованого електроприводу повороту газодетонаційного міномету на основі крокового двигуна шляхом вибору параметрів струму уставки для напівпровідникового перетворювача, відповідно до рівня напруги акумуляторної батареї.*

**Ключові слова:** кроковий двигун; поворотна платформа; газодетонаційний міномет; напруга акумуляторної батареї; струм уставки; вібраційний момент.

## I. ВСТУП

Досвід роботи іноземних армій у міських боях продемонстрував необхідність модернізації бойових машин для ефективної роботи в міських умовах. Наприклад, після конфлікту в Іраку Велика Британія модернізувала танк Challenger II, інтегрувавши міномет як допоміжну зброю. Ця модернізація, продемонстрована на Армійському бойовому експерименті 2018 року, передбачала встановлення міномета на башті танка, що забезпечувало пригнічувальний вогонь та посилену підтримку піхотних підрозділів у міських бойових ситуаціях.

Натомість, українська бронетехніка наразі оснащена димовими гранатометами, ефективна дальність стрільби яких не перевищує 300 метрів, що обмежує їхню корисність у маневреній війні, де швидке та масштабне димове маскування є важливим. Це підкреслює необхідність подальшої модернізації броньованих платформ для покращення адаптивності до міських операцій та підвищення ефективності димових завіс для захисту військ [1].

Танки, бойові машини піхоти та бронетранспортери часто використовуються в міських боях; однак ефективність танків у таких умовах значно обмежена обмеженим кутом піднесення основної гармати, що перешкоджає можливості нейтралізувати цілі [2], розташовані на верхніх поверхах будівель або за перешкодами. Досвід західних військових у міських боях підкреслює важливість розширення оперативних можливостей танків для вирішення проблем забудованої місцевості [3]. Одним із підходів була інтеграція мінометів у системи озброєння танків, що покращило як тактичну гнучкість, так і загальну ефективність [4].

Наприклад, ізраїльські танки «Меркава», розроблені для міських боїв, оснащені 60-мм мінометами. Ця додаткова зброя дозволяє використовувати як проти-піхотні, так і димові гранати, що підвищує здатність протидіяти ворожій піхоті та розгортати димові завіси для маскування або порушення порядку [2]. Отже, оснащення танків мінометами для ураження прихованих цілей, позицій на дахах та важкодоступних місцях є значним кроком до підвищення ефективності танків у міських боях [4].

## II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Національний технічний університет «ХПІ» розробив інноваційний безпороховий міномет із регульованою енергією пострілу, що значно розширює його застосовність у бойових ситуаціях. Було виготовлено та успішно випробувано функціональний експеримен-

тальний прототип, що підтвердило життєздатність новоствореної технології запуску мінометних снарядів без використання звичайного порохового заряду.

Ключовою особливістю цієї конструкції є використання газодетонаційного заряду для регулювання дальності стрільби. На відміну від традиційних мінометів, де дальність регулюється зміною кута піднесення ствола, ця система підтримує постійний кут піднесення, а натомість змінює енергію пострілу. Це стало можливим завдяки заміні порохового заряду горючою газовою сумішшю, що також дозволило безшовну інтеграцію системи керування пострілом міномета із загальною системою керування вогнем [5].

Це рішення підтримує режим напівпрямого вогню, що дозволяє швидке розгортання зброї на полі бою, що особливо вигідно в міських умовах, де швидка реакція та точність мають вирішальне значення [1, 5]. Важливим фактором підвищення точності стрільби є інтеграція міномета з автоматизованою системою прицілювання. Механізм прицілювання побудований навколо поворотної платформи, що дозволяє точно регулювати азимут ствола на основі попередньо встановлених параметрів стрільби.

Запропоновано кроковий двигун для обертання та фіксації платформи під потрібним кутом, що забезпечує високу точність позиціонування та можливість застосування додаткового утримуючого моменту для стабілізації поворотної платформи.

Платформа містить поворотний стіл, що приводиться в рух черв'ячною передачею, що також забезпечує її надійну фіксацію. Крутий момент передається на черв'ячну передачу від крокового двигуна через зубчастий ремінний привід, що зменшує вплив сил навантаження на двигун. Для роботи міномета на стволі встановлено пристрій подачі горючої суміші та електромагнітний мінно-утримувальний вузол, конструктивні та вагові параметри яких описані в [6].

Для опису роботи та розробки математичних моделей електроприводів на основі крокових двигунів запропоновано моделі в [7]. Однак ключовим обмеженням цієї роботи є розрахунок зміни потокозчеплення без урахування насичення магнітного кола. У [8] представлені принципи визначення електромагнітного моменту на основі гармонічних змін потокозчеплення з постійною складовою; однак не враховуються гармоніки вищого порядку, які можуть викликати додаткові вібраційні моменти в двигуні.

Моделі керування кроковими двигунами представлені в [9], де розроблена двофазна гібридна сис-

тема керування кроковим двигуном у розімкненому контурі. Для досягнення меншого кута кроку було запропоновано дві стандартні криві прискорення та уповільнення для онлайн-обчислень у реальному часі на основі технології розподіленого керування. Як зазначається в [10, 11], керування кроковим двигуном може працювати як у конфігураціях з розімкнутим, так і в замкненому циклом. Системи із замкнутим циклом можуть використовувати визначення положення ротора за допомогою нечіткого пропорційно-інтегрально-диференціального контролера [10] та просторово-векторної широтно-імпульсної модуляції (SVPWM) [11]. Ці методи є типовими для традиційного керування із замкнутим циклом і можуть покращити продуктивність; однак, їхні недоліки включають складність та високу вартість.

Як зазначається в [12], системи із замкнутим циклом пропонують кращу продуктивність керування, але можуть збільшити частоту перемикання перетворювача, що, як зазначається в [13] для асинхронних двигунів, може призвести до вищих втрат напівпровідників та вплинути на загальну енергоефективність приводу. Зусилля щодо зниження вартості таких систем, включаючи впровадження прямого керування крутним моментом (DTC), були описані в [14].

Згідно з [9, 15, 16], застосування існуючих систем керування кроковим двигуном часто призводить до надмірної складності системи. Важливим чинком, що впливає на працездатність електроприводу повороту є рівень заряду акумуляторної батареї живлення. В залежності від рівня заряду змінюється напруга живлення приводу, що в свою чергу призводить до зміну струму фаз крокового двигуна та рівень моменту на його валу, що є критично важливим для швидкодії наведення міномету.

### III. МЕТА РОБОТИ

Визначити залежності впливу напруги акумуляторної батареї, що обумовлює рівень її заряду на максимальні та вібраційні моменти, а також діюче значення струму фази двигуна, які ідентифікують ефективність роботи приводу повороту платформи газодетонаційного міномету.

Для досягнення мети були поставлені наступні завдання дослідження:

- розробити імітаційну модель крокового приводу, яка враховує конструктивні параметри навантаження, крокового двигуна та напівпровідникового перетворювача;

- провести комплекс чисельних експериментів на імітаційній моделі для визначення впливу рівня напруги джерела живлення та параметрів керування (струму уставки) на енергетичні та механічні показники двигуна.

## IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГУ МАТЕРІАЛУ І АНАЛІЗ ОТРИМАННИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Для подальших досліджень крокового приводу в роботі розроблено імітаційну модель в системі MATLAB Simulink, яку наведено на рис. 1.

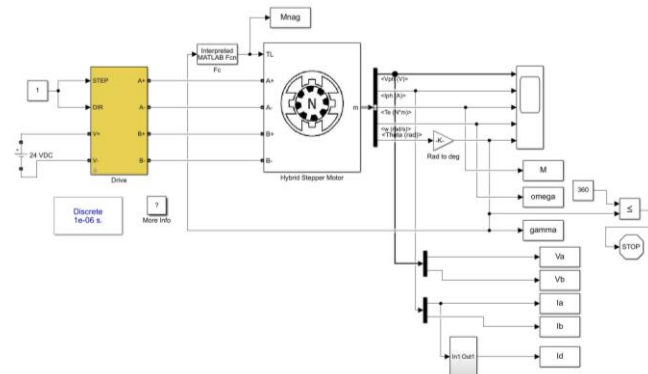


Рисунок 1. Імітаційна модель крокового приводу поворотної платформи

Модель складається з системи крокового двигуна – Hybrid Stepper Motor; підсистема живлення та управління (Drive), яка моделює роботу системи керування та напівпровідникового перетворювача; MATLAB функцію Fc, яка реалізує зміну моменту навантаження в залежності від кута повороту поворотної платформи, а також додаткові блоки передачі даних, таких як визначення діючого значення струму, джерело живлення (24VDC), блоки зупинки процесу моделювання (STOP) (рис. 2).

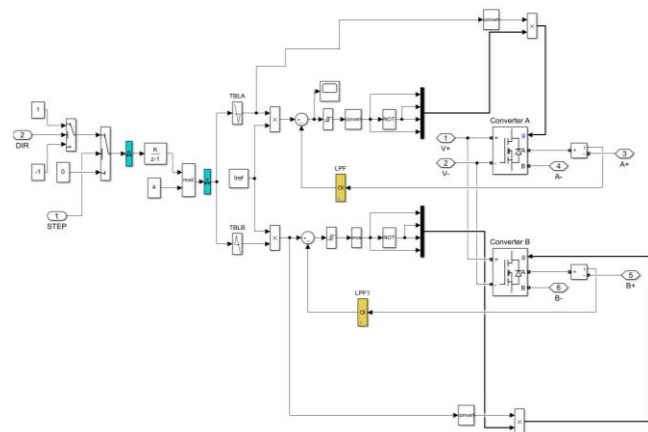


Рисунок 2. Імітаційна модель блоку підсистема живлення та управління (Drive) крокового приводу поворотної платформи

Імітаційна модель крокового двигуна розроблена на підставі вирішення диференціальних рівнянь фази двигуна, яку запропоновано у [9]. Фази двигуна є магнітно незалежними. Основні параметри двигуна, який застосовується в приводі та їх позначення в елементах моделі, наведено у табл.1.

**Таблиця 1.** Параметри елементів крокового приводу повороту платформи

| Параметр  | Значення                               |
|---|--|
| тип двигуна   | SY130ST199-6004A                       |
| кількість фаз (Number of phases)  | 2                                      |
| індуктивність обмотки фази (Winding inductance)   | $12 \cdot 10^{-3}$ Гн                  |
| активний опір фази (Winding resistance)   | 0,75 Ом;                               |
| геометричний кут кроку обертання ротору двигуна при подачі одного імпульсу (Step angle) | $1,8^\circ$                            |
| максимальне потокозчеплення (Maximum flux linkage)                                      | $7,2 \cdot 10^{-2}$ Вб;                |
| реактивний момент двигуна   | 0,25 Н·м;                              |
| момент інерції приводу приведений до валу двигуна (Total inertia)                       | $33 \cdot 10^{-4}$ кг·м <sup>2</sup> ; |
| загальний коефіцієнт тертя приводу (Total friction)                                     | $10^{-6}$ Н·с/м                        |
| тип двигуна   | SY130ST199-6004A                       |
| кількість фаз (Number of phases)  | 2                                      |
| індуктивність обмотки фази (Winding inductance)   | $12 \cdot 10^{-3}$ Гн                  |
| активний опір фази (Winding resistance)   | 0,75 Ом                                |
| геометричний кут кроку обертання ротору двигуна при подачі одного імпульсу (Step angle) | $1,8^\circ$                            |
| максимальне потокозчеплення (Maximum flux linkage)                                      | $7,2 \cdot 10^{-2}$ Вб                 |
| реактивний момент двигуна   | 0,25 Н·м                               |
| момент інерції приводу приведений до валу двигуна (Total inertia)                       | $33 \cdot 10^{-4}$ кг·м <sup>2</sup>   |

Модель підсистеми живлення та управління наведено на рис. 2. Модель складається з системи управління, яку створено на основі двох незалежних блоків керування однофазних мостових інверторів (Converter A та Converter B). Роботу інверторів узгоджено вхідними блоками до яких поступають сигнали направлення руху (DIR) та зупинки (STEP).

В системі керування, кожний канал керування автономним мостовим однофазним інвертором має зворотній зв'язок за каналом струму на транзисторах, що реалізовано блоками LPF та LPF1 для фаз А та В відповідно. Однофазні інвертори Converter A та Converter B створено з однотипних базових блоків за допомогою підсистем Converter Simulink у режимі

MOSFET/Diodes.

MATLAB функцію Fc, що реалізує зміну моменту навантаження, задає монотонну зміну навантаження від 6 Н·м до 6,7 Н·м, при зміні кута повороту платформи від  $0^\circ$  до  $180^\circ$ , та від 6,7 Н·м до 6 Н·м, при зміні кута повороту платформи від  $180^\circ$  до  $360^\circ$ . Такі дані було визначено експериментальним шляхом при нахилі платформи з мінометом на кут  $10^\circ$ , що може статися у реальних обставинах використання міномету на транспортному засобі.

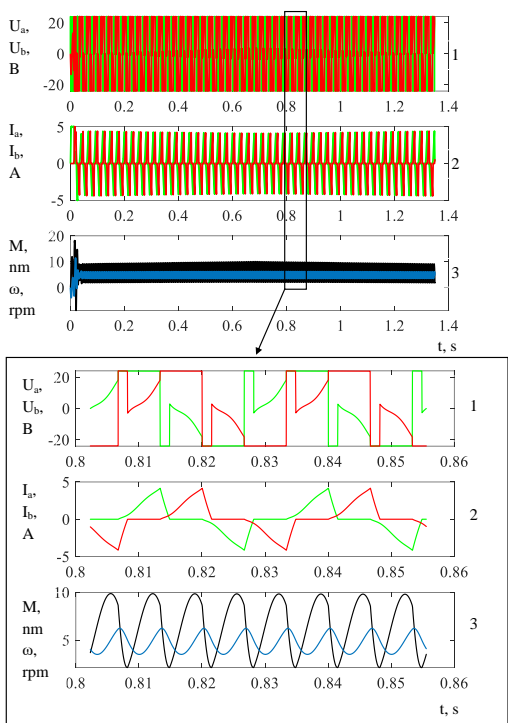
Моделювання роботи приводу проводиться з використанням вирішувача зі змінним кроком та автоматичним керуванням кроком вирішення при максимальному кроці  $2 \cdot 10^{-6}$  с.

Процес моделювання розглянемо на прикладі роботи крокового приводу повороту платформи на прикладі напруги акумуляторної батареї 24 В, частоти обертання 45 об/хв. та струмі уставки 5А. При інших значеннях параметрів керування фізичні процеси мають подібний вигляд.

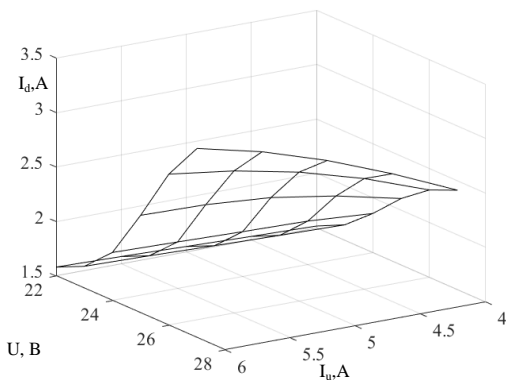
При проведенні досліджень було встановлено, що процес роботи привода можливо умовно поділити на пуск двигуна, який супроводжується роботою приводу у режимі обмеження струму що складає від 0,012 до 0,027с (рис. 3), в залежності від струмів уставки і заданої частоти обертання. та роботу у номінальному режимі. Зміна навантаження за час обертання не причиняє значного впливу на фізичні процеси роботи та впливає лише на діюче значення струму фази двигуна.

Робота крокового приводу проходить шляхом подачі напруги від мостових однофазних інверторів на фази крокового двигуна (рис.3), які зсунуті друг відносно другу на півфази. Напруга фази має прямокутну форму зі значним спаданням у першій половині фази, яка обумовлена дією електрорушійної сили, що наводиться у фазі (рис.5, поз 1). Струм фази має трикутний вигляд, що обумовлено поступовим зростанням та падінням струму за експоненційними кривими (рис.3, поз 2). При роботі двигуна реалізується максимальний електромагнітний момент який дорівнює 18,87 Н·м. (рис.3, поз 3).

Для подальших досліджень, за результатами моделювання, знаходились амплітуди змінних складових моменту на валу крокового двигуна. При напрузі акумуляторної батареї 24 В та струмі уставки 5А він складає 7,715 Н·м (рис.3, поз 3).



**Рисунок 3.** Результати моделювання роботи крокового приводу повороту платформи міномету за напругою акумуляторної батареї 24 В та струмі уставки 5А при обертанні платформи від 0° до 4°: 1– напруги фаз, В, 2 – струми фаз, А, 3 – момент на валу двигуна, Н м та частота обертання, об/хв. Червоні лінії – фаза А, зелена фаза В.

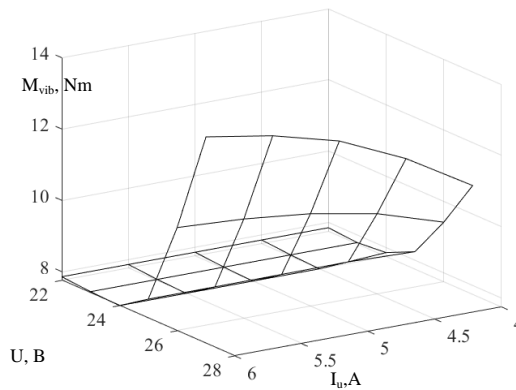


**Рисунок 4.** Залежність діючого струму фази  $I_d$  від напруги акумуляторної батареї  $U$  та струму уставки  $I_u$

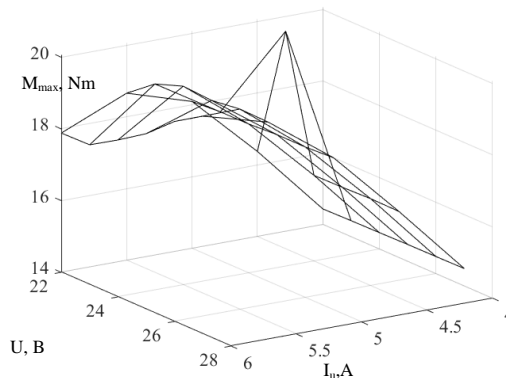
Комплекс чисельних експериментів на імітаційній моделі, що наведені на рис. 1 та рис. 2, для визначення впливу напруги акумуляторної батареї та струму уставки, проводились шляхом визначення залежності діючого значення струму фази двигуна (рис. 4), амплітуди змінної складової моменту (вібраційного моменту) на його валу (рис.5) та максимального моменту на валу двигуна (рис.6).

Процес моделювання режиму роботи проводи-

лись при зміні струму уставки  $I_u$  від 4 А до 6 А, напрузі акумуляторної батареї від 22В до 27 В..



**Рисунок 5.** Залежність амплітуди вібраційного моменту на валу крокового двигуна  $M_{vib}$  від напруги акумуляторної батареї  $U$  та струму уставки  $I_u$



**Рисунок 6.** Залежність максимального значення моменту на валу крокового двигуна  $M_{max}$  від напруги акумуляторної батареї  $U$  та струму уставки  $I_u$

За результатами аналізу результатів досліджень отриманих на рис.4-6 отримане наступне. Діюче значення струму фази (рис. 4) має змінний характер. Зміна діючого значення струму від струму уставки збільшується при збільшенні напруги живлення від 2,41 А до 3,23 А при напрузі акумуляторної батареї 27 В. При низьких значеннях напруги вплив струму уставки на діюче значення струму фази двигуна незначний від 1,52А до 1,58 А. При збільшенні напруги акумуляторної батареї з 22 В до 27 В при усіх значеннях струму уставки спостерігається монотонне збільшення діючого струму фази.

Рівень вібраційного моменту (рис.5) на валу двигуна значно зростає при збільшенні напруги батареї. Струм уставки зменшує рівень вібрацій, однак це зниження ефективне лише при напругах акумулятора від 26В до 27В.

Що стосується максимального моменту (рис.6) на валу двигуна визначено наступне. При високих

значеннях напруги акумулятора та високих значеннях струму уставки спостерігається значне зростання максимальних пускових моментів. Тому при пуску привода необхідно примусове зменшення струму уставки до рівня 4,5 А.

Отримані результати досліджень можна використати на практиці при створенні автоматизованого електроприводу повороту газодетонаційного міномету на основі крокового двигуна шляхом вибору параметрів струму уставки для напівпровідникового перетворювача, відповідно до рівня напруги акумуляторної батареї. Проведені дослідження можна покласти в основу методики визначення параметрів керування електроприводу повороту на основі крокового двигуна.

Перспективи подальших досліджень. Діюче значення струму фази двигуна обумовлює теплові процеси в ньому та напівпровідниковому перетворювачі. При подальших дослідженнях теплових процесів у приводі буде розглянуто вплив діючого струму на температуру елементів конструкції крокового двигуна у режимах відпрацювання заданих параметрів сигналу наведення міномету та режимах слідкування за ціллю.

Вібраційний момент визначає точність відпрацювання сигналу керування. Мінімізація цього моменту призводить до підвищення точності пострілу, які можливо використати при подальших дослідженнях у польових випробуваннях міномету.

Для вибору оптимальних значень струму уставки при зміні рівня заряду та напруги акумуляторної батареї у основному режимі роботи можливо на підставі теорії прийняття рішень та буде напрямом подальших досліджень.

**Подяка.** Робота виконана за фінансової підтримки Національного Фонду Досліджень України. Реєстраційний номер проекту: 2023.04/0101, « Автоматизований привід наведення та система управління газодетонаційного міномету для пострілу димовими мінами».

## V. ВИСНОВКИ

В результаті проведених досліджень електроприводу повороту платформи газодетонаційного міномету, що створено на основі крокового двигуна було:

– розроблено імітаційну модель крокового приводу, особливістю якої є врахування конструктивних параметрів навантаження, крокового двигуна та напівпровідникового перетворювача, параметрів системи керування та крокового двигуна;

– проведено комплекс чисельних експериментів на імітаційній моделі для визначення впливу рівня напруги акумуляторної батареї та струму уставки на діючий струм фази двигуна, його вібраційний та максимальний моменти;

– визначено, що керування струмом уставки може призвести до стабілізації режимів роботи привода

повороту платформи газодетонаційного міномету при розряді акумулятора живлення та зниженні його напруги.

Результати проведених досліджень можуть бути корисні при розробці систем наведення на основі крокових двигунів.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Сакун О. В. Історія та перспективи застосування танкових мінометів // *Механіка та машинобудування*. – 2018. – № 1. – С. 89–96.
- [2] Merkava 4 [Електронний ресурс] // *Army Recognition*. – Режим доступу: <https://www.armyrecognition.com/military-products/army/main-battle-tanks/main-battle-tanks/merkava-iv-4-israel-uk> (дата звернення: 05.09.2024).
- [3] Streetfighter and the future of the Challenger 2 [Електронний ресурс] // *Army Technology*. – Режим доступу: <https://www.armytechnology.com/features/streetfighter-challenger-2/?cf-view> (дата звернення: 05.09.2024).
- [4] British Army demos new Challenger 2 urban operation tank concept [Електронний ресурс] // *Shephard Media*. – Режим доступу: <https://www.shephardmedia.com/news/landwarfareintl/british-army-demos-new-challenger-2-urban-operation/> (дата звернення: 05.09.2024).
- [5] Senderowski C., Panas A. J., Fikus B., Zasada D., Kopec M., Korytchenko K. V. Effects of heat and momentum gain differentiation during gas detonation spraying of FeAl powder particles into the water // *Materials*. – 2021. – Vol. 14, № 23. – Art. № 7443. – DOI: 10.3390/ma14237443.
- [6] Любарський Б. Г., Кривошеєв С. Ю., Єресько О. В., Галиця В. І., Поляков І. В., Любарський Д. Б. Визначення зусиль у енергоефективній системі електромагнітного утримання заряду // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Енергетика. – 2024. – № 2 (9). – С. 25–30. – DOI: 10.20998/EREE.2024.2(9).316265.
- [7] Kenjo T., Sugawara A. *Stepping motors and their microprocessor controls*. – 2nd ed. – Oxford : Oxford University Press, 2003.
- [8] Acarnley P. *Stepping motors: A guide to theory and practice*. – 4th ed. – London : The Institution of Electrical Engineers, 2002.
- [9] Zhang D., Wang J., Qian L., Yi J. Stepper motor open-loop control system modeling and control strategy optimization // *Archives of Electrical Engineering*. – 2019. – Vol. 68, № 1. – P. 63–75. – DOI: 10.24425/aee.2019.125980.
- [10] Wang L., Xin X., Zhu L. A widely tunable fiber ring laser with closed loop control based on high-precision stepper motor // *Optoelectronics Letters*. –

2016. – Vol. 3. – P. 169–172. – DOI: 10.1007/s11801-016-6033-2.
- [11] Wang Q., Lu Q. High performance closed loop drive of two phase hybrid stepping motor. – Zhejiang Province : Zhejiang Sci-Tech University, 2017. – DOI: 10.24425/aee.2019.125980.
- [12] Stănică D.-M., Lita I., Oproescu M. Comparative analysis of stepper motors in open loop and closed loop used in nuclear engineering // IEEE 23rd International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging. – 2017.
- [13] Liubarskyi B., Petrenko A., Iakunin D., Dubinina O. Optimization of thermal modes and cooling systems of the induction traction engines of trams // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies and Computer Systems Engineering Technological Systems. – 2017. – № 3(9[87]). – P. 59–67.
- [14] Goolak S., Liubarskyi B., Riabov I., Chepurna N., Pohosov O. Simulation of a direct torque control system in the presence of winding asymmetry in induction motor // Engineering Research Express. – 2023. – Режим доступу: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/2631-8695/acde46>.
- [15] Deng N., Yingcao H., Ganghu C. Application of stepper motor subdivision drive in transformation of CA6140 lathe // IEEE 11th Conference on Industrial Electronics and Applications. – 2016.
- [16] Kim W., Shin D., Lee Y., Chung C. C. Simplified torque modulated microstepping for position control of permanent magnet stepper motors // Mechatronics. – 2016. – Vol. 35, № 5. – P. 162–172.

Надійшла (Received) 12.08.2025;

Прийнята (Accepted) 22.08.2025;

Опублікована (Published) 22.10.2025;

## INFLUENCE OF BATTERY VOLTAGE ON THE ELECTROMECHANICAL CHARACTERISTICS OF THE STEPPER DRIVE FOR ROTATION OF THE PLATFORM OF A GAS DETONATION MORTAR

- LIUBARSKYI B. Sci.D, Professor, Head of Department of Electrical Transport and Diesel Locomotive of the National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2985-7345>, e-mail: [lboris1911@ukr.net](mailto:lboris1911@ukr.net);
- KRYVOSHEIEV S. Ph.D, Associate professor, Head of the Department of Industrial and biomedical electronics of the National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8771-2961>, [Serhii.Kryvosheiev@kphi.edu.ua](mailto:Serhii.Kryvosheiev@kphi.edu.ua);
- ERESKO O. Ph.D, Associate professor, Associate professor of the Department of Industrial and biomedical electronics of the National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3521-5314>, [oleksandr.eresko@kphi.edu.ua](mailto:oleksandr.eresko@kphi.edu.ua);
- HALYTSIA V. Ph.D, Associate professor of the Department of Physical Education of the National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3521-5314>, [vitaliy.galitsa@gmail.com](mailto:vitaliy.galitsa@gmail.com);
- SAKUN O. Sci.D, Head of Department of Military Training of the Military Institute of Tank Troops of the National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine, ORCID <http://orcid.org/0000-0002-2964-071X>, e-mail: [sakunav71@gmail.com](mailto:sakunav71@gmail.com);
- LIUBARSKYI D. Engineer of the Department of Industrial and biomedical electronics of the National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3535-9809>, [dizas005@ukr.net](mailto:dizas005@ukr.net);

**Purpose.** Determine the dependence of the influence of the battery voltage, which determines the level of its charge, on the maximum and vibration moments, as well as the effective value of the motor phase current, which identify the efficiency of the drive for rotating the platform of a gas-detonation mortar.

**Methodology.** Simulation modeling method.

**Findings.** A simulation model of a stepper drive has been developed, the peculiarity of which is the consideration of the design parameters of the load, stepper motor and semiconductor converter, parameters of the control system and stepper motor; a set of numerical experiments has been carried out on the simulation model to determine the influence of the battery voltage level and the setpoint current on the effective current of the motor phase, its vibration and maximum moments; it has been determined that controlling the setpoint current can lead to stabilization of the operating modes of the gas-detonation mortar platform rotation drive when the power battery is discharged and its voltage de-

creases. It has been determined that the effective value of the phase current is variable. The change in the effective current value from the setpoint current increases with an increase in the supply voltage from 2.41 A to 3.23 A at a battery voltage of 27 V. At low voltage values, the effect of the setpoint current on the effective value of the motor phase current is insignificant from 1.52 A to 1.58 A. When the battery voltage increases from 22 V to 27 V, a monotonous increase in the effective phase current is observed at all values of the setpoint current. The level of vibration torque on the motor shaft increases significantly with an increase in battery voltage. The setpoint current reduces the vibration level, however, this reduction is effective only at battery voltages from 26 V to 27 V. It has been determined that at high battery voltage values and high values of the setpoint current, a significant increase in maximum starting torques is observed. Therefore, when starting the drive, a forced reduction of the setpoint current to the level of 4.5 A is recommended.

**Originality.** For the first time, the dependences of the effective values of phase currents and the level of vibration, maximum moments of the stepper drive for rotating the platform of a gas-detonation mortar on the voltage of the power battery have been determined, which can be used when creating an automated control system.

**Practical value.** The obtained research results can be used in practice when creating an automated electric drive for turning a gas-detonation mortar based on a stepper motor by selecting the parameters of the setpoint current for the semiconductor converter, in accordance with the voltage level of the battery.

**Keywords:** *stepper motor; rotary platform; gas-detonation mortar; battery voltage; setpoint current; vibration torque..*

## REFERENCES

- [1] 1. Sakun, O. V. (2018). Istoriia ta perspektyvy zasto-suvannia tankovykh minometiv. *Mekhanika ta mashynobuduvannia*, (1), 89–96.
- [2] 2. Merkava 4. (n.d.). Army Recognition. <https://www.armyrecognition.com/military-products/army/main-battle-tanks/main-battle-tanks/merkava-iv-4-israel-uk>
- [3] 3. Streetfighter and the future of the Challenger 2. (n.d.). Army Technology. <https://www.army-technology.com/features/streetfighter-challenger-2/?cf-view>
- [4] 4. British Army demos new Challenger 2 urban operation tank concept. (n.d.). Shephard Media. <https://www.shephardmedia.com/news/landwarfareintl/british-army-demos-new-challenger-2-urban-operatio/>
- [5] 5. Senderowski, C., Panas, A. J., Fikus, B., Zasada, D., Kopec, M., & Korytchenko, K. V. (2021). Effects of heat and momentum gain differentiation during gas detonation spraying of FeAl powder particles into the water. *Materials*, 14(23), 7443. <https://doi.org/10.3390/ma14237443>
- [6] 6. Liubarskyi, B. H., Kryvosheiev, S. Yu., Yeresko, O. V., Halytsia, V. I., Poliakov, I. V., & Liubarskyi, D. B. (2024). Vyznachennia zusyly u enerhoefektyvnykh systemi elektromahnitnoho utrymannia zariadu. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI»*. Serii: Enerhetyka, (2[9]), 25–30. [https://doi.org/10.20998/EREE.2024.2\(9\).316265](https://doi.org/10.20998/EREE.2024.2(9).316265)
- [7] 7. Kenjo, T., & Sugawara, A. (2003). *Stepping motors and their microprocessor controls* (2nd ed.). Oxford University Press.
- [8] 8. Acarnley, P. (2002). *Stepping motors: A guide to theory and practice* (4th ed.). The Institution of Electrical Engineers.
- [9] 9. Zhang, D., Wang, J., Qian, L., & Yi, J. (2019). Stepper motor open-loop control system modeling and control strategy optimization. *Archives of Electrical Engineering*, 68(1), 63–75. <https://doi.org/10.24425/aee.2019.125980>
- [10] 10. Wang, L., Xin, X., & Zhu, L. (2016). A widely tunable fiber ring laser with closed loop control based on high-precision stepper motor. *Optoelectronics Letters*, 3, 169–172. DOI: 10.1007/s11801-016-6033-2
- [11] 11. Wang, Q., & Lu, Q. (2017). High performance closed loop drive of two phase hybrid stepping motor. Zhejiang Sci-Tech University. DOI: 10.24425/aee.2019.125980
- [12] 12. Stănică, D.-M., Lita, I., & Oproescu, M. (2017). Comparative analysis of stepper motors in open loop and closed loop used in nuclear engineering. In *IEEE 23rd International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging*.
- [13] 13. Liubarskyi, B., Petrenko, A., Iakunin, D., & Dubinina, O. (2017). Optimization of thermal modes and cooling systems of the induction traction engines of trams. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies and Computer Systems Engineering Technological Systems*, 3(9[87]), 59–67.
- [14] 14. Goolak, S., Liubarskyi, B., Riabov, I., Chepurna, N., & Pohosov, O. (2023). Simulation of a direct torque control system in the presence of winding asymmetry in induction motor. *Engineering Research Express*. <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/2631-8695/acde46>
- [15] 15. Deng, N., Yingcao, H., & Ganghu, C. (2016). Application of stepper motor subdivision drive in transformation of CA6140 lathe. In *IEEE 11th Conference on Industrial Electronics and Applications*.
- [16] 16. Kim, W., Shin, D., Lee, Y., & Chung, C. C. (2016). Simplified torque modulated microstepping for position control of permanent magnet stepper motors. *Mechatronics*, 35(5), 162–172.



## УЗАГАЛЬНЕНІ ПАРАМЕТРИ СИСТЕМИ ЗБУДЖЕННЯ СИНХРОННОГО ПРИВОДА З УДАРНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ

- БОРОДАЙ В.А.** канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електропривода Національного ТУ „Дніпровська політехніка”, Дніпро, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-7721-8752>, e-mail: [borodai.v.a@nmu.one](mailto:borodai.v.a@nmu.one);
- БОРОВИК Р.О.** інженер, старший викладач кафедри електропривода Національного ТУ „Дніпровська політехніка”, Дніпро, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5230-7747>, e-mail: [borovyk.r.o@nmu.one](mailto:borovyk.r.o@nmu.one);
- НЕСТЕРОВА О.Ю.** канд. педагог. наук, доцент, завідувач кафедри філософії та педагогіки Національного ТУ „Дніпровська політехніка”, Дніпро, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5952-4664>, e-mail: [Nesterova.O.Yu@nmu.one](mailto:Nesterova.O.Yu@nmu.one).

**Мета роботи.** Узагальнити параметри оригінальної системи керування збудженням синхронних приводів для розповсюдження їх результатів на потужні виробничі комплекси, які працюють у режимах періодичних ударних навантажень, що сприятиме ліквідації аварійності через руйнування конструкції електромагнітної системи синхронних машин механізмів даного типу.

**Методи дослідження.** Для проведення досліджень використані положення теорії електричних машин, теорії автоматичного керування, методи розв'язання оптимізаційних задач із використанням математичного пакету MATHCAD, способи та методи моделювання у середовищі MATLAB складової SIMULINK.

**Отримані результати.** Шляхом вирішення оптимізаційної задачі отримано поліноміальні залежності рівнів форсування системи збудження синхронного привода із врахуванням величини поточного навантаження і штатними параметрами пружної муфти, а також визначені параметри ПІ-регулятора із уточненням коефіцієнту інтегральної ланки, що дозволяє уникнути надлишкової коливальності процесу накиду екстремального навантаження.

**Наукова новизна.** Враховуючи технологічні умови роботи автомат-стану ТПА-350 інструменту виготовлення цільнотягнутих труб, запропоновано оригінальний підхід та отримано поліноміальні залежності узагальнення основних параметрів керування системою збудження синхронного привода, який працює у режимі періодичних екстремальних навантажень та показано перспективу використання даної системи у складі промислових збудників засобів живлення індукторних обмоток потужних синхронних приводів металургійних і дробарно-подрібнювальних механізмів.

**Практична цінність.** Отримані поліноміальні залежності головних параметрів системи керування збудженням потужних синхронних приводів дають можливість рекомендувати виробникам та проєктувальникам конкретні значення форсування, параметри ПІ-регулятора та задавача інтенсивності, що дозволить уникнути коштовних ремонтів і простоїв автомат-стану, які супроводжуються значними фінансовими витратами.

**Ключові слова:** автомат-стан; потужний синхронний привод; система збудження; розв'язання оптимізаційної задачі; математичне та структурне моделювання; лінії тренду узагальнених параметрів.

### I. ВСТУП

Останнім часом досить гостро стало питання енергоощадності та енергоефективності. У світлі цього в промислове виробництво, де потужності приводів вище за 1 МВт, замість двигунів постійного струму та асинхронних двигунів впроваджують синхронні двигуни з ККД 98 %, а можливість регулювання коефіцієнта потужності дозволяє додатково здійснювати компенсацію реактивної потужності за одночасного виконання технологічного завдання.

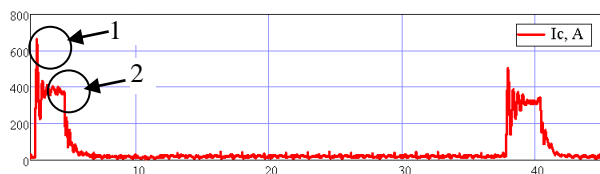
Вивчення реконструкції автомат-станів ТПА-350 виявило проблеми установки двигунів із абсолютно жорсткою механічною характеристикою, які не до-

зволяють використовувати кінетичні накопичувачі енергії, що призводить до суттєвого зростання ударних динамічних навантажень в режимах втягнення заготовок у валки і, власне, прокат. Наслідок – руйнування ізоляції обмоток якоря та ротора машини, що вимагає капітальних ремонтів і веде до простоїв високопродуктивного обладнання [1].

### II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Висновок попереднього розділу свідчить, що причиною руйнування обмоток синхронного привода автомат-стану ТПА-350 і механізмів подібного типу [1], [2] є виникнення значних динамічних зусиль протягом часу екстремального перепаду струму якоря

(рис. 1), який з'являється внаслідок дії ударного прикладання навантаження.



1 – екстремальне та 2 – залишкове збурення

**Рисунок 1.** Діючий струм статора упродовж двох проходів заготовки стану ТПА-350

Поруч з тим встановлено, що на цей процес можливо впливати через контур збудження шляхом встановлення деякого регулятора або ступеневої зміни завдання на збудження з наперед відомими рівнем і часом нарощування струму індуктора.

Дослідженням впливу періодичних динамічних коливань в трубокатних агрегатах з автомат-станами і пошук шляхів зменшення їх впливу займалися Рахманов С.Р. [3] - [8], Балакін В.Ф. [9], Хацке-лян І.П. [10], [11], Поворотний В.В. [12] - [14], Pavlo Krot [15], [16] та ін. Ними досліджувались процеси деформації гільзи та навантаження, що виникають в механічній частині стана, не враховуючи вплив приводного двигуна.

Традиційно головний привод прокатних станів комплектувався двигунами постійного струму, завдяки значним регулювальним можливостям. З часом, для потужних промислових механізмів, де не потрібне регулювання швидкості, зокрема, в окремих установках металургійного виробництва для механізмів з ударним навантаженням (приводи валків трубопрокатних станів, ножиці, приводи чорнових клітей тощо) почали застосовувати асинхронні двигуни із маховиком, які згодом поступово замінювали на синхронні електродвигуни, які мають низку переваг завдяки їх властивостям [17]. Такі переваги, як висока надійність, через великий повітряний зазор, можливість компенсації реактивної потужності, високий ККД, значна жорсткість механічної характеристики і, нарешті, застосування тихохідних двигунів, які допускають виключити редуктори зі складу кінематичних схем, зумовлюють унікальність конкурентних переваг цього типу двигунів [18], [19].

В режимі холостого ходу синхронний електропривод прокатного стану працює зі зниженою напругою збудження з метою зменшення нагріву обмотки і енерговитрат (рис. 1). Найбільш суттєві зміни навантаження відбуваються при захваті валками металу й виході його з кліті. При цьому автоматична система регулювання збудження забезпечує необхідну стійкість двигуна для утримання його в синхронізмі форсуванням напруги збудження. З цією метою використовують різні методи і засоби. Наприклад автори джерел [20], [21] оснащують систему збудження ємні-

сним накопичувачем енергії з метою компенсації постійної часу обмотки збудження; в [22] пропонується разом із застосуванням, при форсуванні, ємнісного накопичувача чергувати періоди форсування напруги з періодами гасіння поля.

Запропоновані способи забезпечують стійкість при різкому прикладанні навантаження, проте не враховують впливу електродинамічних навантажень на обмотки двигуна.

Зазвичай дію динамічних ударів компенсують механічними або електромагнітними способами. До них слід віднести наявність маховика в електро-механічних системах з м'якою механічною характеристикою двигуна, регулювання жорсткості пружних муфт і використання автоматичної системи збудження з можливістю форсування напруги.

Висока жорсткість механічної характеристики синхронного двигуна не дає змоги застосовувати маховик як демпферний механізм. Тому такий спосіб втрачає сенс, як потенційно можливий.

Є спосіб компенсації ударних навантажень введенням в кінематичну схему пружних муфт. Проте слід зазначити, що випадок застосування абсолютно жорсткого зв'язку виявив непрацездатність системи через її значну коливальність [1].

Крім механічних підходів розв'язання проблеми роботи синхронного електропривода, не слід забувати про застосування автоматичної системи керування збудженням.

Спосіб електромагнітного демпфування коливань кута навантаження здебільш завдяки контуру збудження [23] забезпечується форсуванням напруги збудження із заданими швидкістю і рівнем. Складність реалізації способу полягає у неспроможності серійних автоматичних збудників забезпечити достатній рівень форсування напруги. Крім того питання щодо стійкості обмоток двигунів за умови різкозмінного підвищення напруги не є вирішеним.

Можливо вважати перспективним спосіб підвищення протидії синхронних приводів [24] ударним навантаженням шляхом прискорення швидкості форсування збудження завдяки розряду попередньо зарядженого конденсатора. Проте і в цьому випадку питання стійкості ізоляції двигуна має суттєві обмеження.

Автоматична система збудження [25], яка компенсує коливання за рахунок нелінійних зворотних зв'язків, досить добре поглинає збурення малої амплітуди. Поруч з тим про екстремальні значення збурень такого сказати не можна.

Доцільність методу програмного керування напругою збудника показана в [26]. Суть методу - живлення обмотки збудження періодичною змінною напругою, яка одночасно зменшує періодичну складову електромагнітного моменту і частково підвищує його середню складову. Недоліком методу є необхідність

використання реверсивного збудника.

Сутність методу [27] полягає в оптимальному налагодженні регулятора та пружності системи в наперед оговорених умовах. Однак і такий спосіб лише частково відповідає вимогам компенсації екстремальних навантажень.

Метод [28], [29] демонструє потенційну можливість компенсації пускових струмів за рахунок випереджаючого збільшення напруги збудження на прогнозований провал напруги живлення. Утім, ця система збудження адаптована для роботи синхронного генератора.

Проаналізовані методи керування системою збудження мало відповідають умовам нейтралізації шкідливих зусиль в якірних котушках синхронних приводів. Тому в даній роботі поставлена задача реалізується, базуючись на публікаціях [30], [31], що за нових умов дозволить узагальнити головні параметри системи збудження потужних синхронних приводів механізмів із періодичною появою ударного навантаження.

### III. МЕТА РОБОТИ

Узагальнити параметри оригінальної системи керування збудженням синхронних приводів для розповсюдження їх результатів на потужні виробничі комплекси, які працюють у режимах періодичних ударних навантажень, що сприятиме ліквідації аварійності через руйнування конструкції електромагнітної системи синхронних машин механізмів даного типу.

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

*Обґрунтування оптимізації форсування і параметрів системи регулювання збудження.*

Досвід досліджень джерела [31] констатує, що існуючі системи автоматичного керування синхронним приводом не спроможні компенсувати екстремальну складову струму якоря, яка виникає в наслідок різко-змінних навантажень. Тому роботу системи збудження механізмів із ударним навантаженням пропонується розділити на два етапи.

Етап перший – здійснення демпфування максимального збурення (рис. 1, 1) шляхом завчасного форсування напруги збудження, де рівень форсування визначається шляхом розв'язання оптимізаційної задачі з обмеженнями:

- кратність форсування збудження  $1 \dots 1,75$  номінального, обмежено можливістю збудника;
- межі кратності жорсткості з'єднувальної муфти  $1 \dots 4$ , що лімітується максимумом коливальності системи;

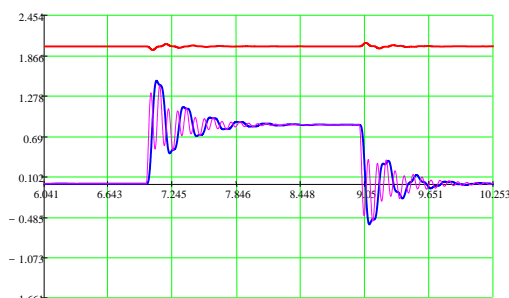
- можливий інтервал часу завчасного ввімкнення форсування визначається п'ятьма постійними часу обмотки збудження, що забезпечує гарантоване завершення перехідного процесу.

Як функцію мети запропоновано використовувати мінімум середньоквадратичного відхилення від усталеного значення струму якоря під час накиду номінального навантаження

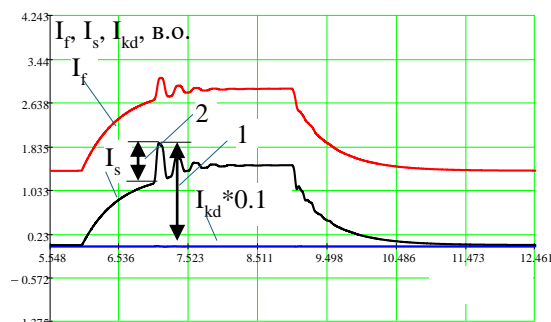
$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^n (I_i - I_{уст})^2}{n-1}} \quad (1)$$

де  $I_i$ ,  $I_{уст}$  – миттєве і стале значення струму якоря,  $n$  – число дискрет.

Розв'язання задачі пропонується виконати за допомогою вбудованої функції Minimize пакета MathCAD, де використовують градієнтний спосіб пошуку оптимального рішення. Тобто рівень форсування, який відповідає цій умові і забезпечує кращий спосіб демпфування максимального збурення струму якоря (рис. 1, 1). На прикладі рис. 2 перепад струму якоря по відношенню до сталого холостого режиму вдалось зменшити приблизно до 30 %.



а



б

а)  $\omega$  – швидкість;  $M_s$ ,  $M_s$  – пружний і моторний моменти; б)  $I_f$  – струми збудження,  $I_s$  – якоря та  $I_{kd}$  – демпферної обмотки, 1 – існуючий і 2 – запропонований перепад струму якоря

**Рисунок 2.** Результат вирішення оптимізаційної задачі на прикладі двигуна СДМЗ-2-64-40 УХЛ4



Інший аспект досліджень, на який слід звернути увагу – це те, що протягом початкових експериментів було встановлено несуттєвий вплив пружних елементів електромеханічних систем, а саме важливе у випадку модернізації існуючого обладнання, регулювання параметру пружності муфти ускладнено або неможливо зовсім в силу конструктивних особливостей пружного елемента. Тому при проведенні досліджень цього етапу було прийнято рішення до звуження переліку факторів впливу оптимізаційної задачі. Їх обмежено тільки рівнем параметру форсування контуру збудження за одночасного контролю величини середньоквадратичного відхилення поточного значення струму якоря.

У якості дослідних двигунів прийняті наступні електричні машини табл. 1: СДМЗ-2-22-34-60 УХЛ4; СДС-19-46-40 УХЛ4; СДС-19-56-40 УХЛ4; СДМЗ-2-21-64-40 УХЛ4; СДМЗ-2-24-59-80 УХЛ4. Вхідний матеріал для моделювання взято із розрахункових формулярів заводу виробника унікальних потужних електричних машин.

Також, попередніми дослідженнями встановлено наявність впливу рівня навантаження на величину завдання на збудження. В програмі випробувань навантаження варіювалось у межах від 0,6 до 1 номінального, чого цілком достатньо аби охопити усі можливі варіанти навантаження. Щодо форсування, то у цьому випадку межі оптимальних значень змінювались від 0,8 до 1,75 номінального.

Для кожного типу двигуна розроблене програмне забезпечення за принципом, який показано вище (етап 1). Змінюючи по черзі вхідні дані двигунів та рівень навантаження в MathCad алгоритмі отримано фактичні результати параметру рівня форсування табл. 3 відхилення табл. 2, які далі представлені у графічній формі (рис. 5).

**Таблиця 2.** Матриця відповідності середньоквадратичного відхилення

| $k_{mc}$ | СДМЗ-2-22-34-60<br>УХЛ4 | СДС-19-46-40<br>УХЛ4 | СДС-19-56-40<br>УХЛ4 | СДМЗ-2-21-64-40<br>УХЛ4 | СДМЗ-2-24-59-80-<br>УХЛ4 |
|----------|-------------------------|----------------------|----------------------|-------------------------|--------------------------|
| код      | 1                       | 2                    | 3                    | 4                       | 5                        |
| 0.6      | 0.02412                 | 0.044579             | 0.050885             | 0.051538                | 0.067657                 |
| 0.65     | 0.026205                | 0.044918             | 0.05141              | 0.051685                | 0.075683                 |
| 0.7      | 0.028787                | 0.045229             | 0.05181              | 0.051855                | 0.083719                 |
| 0.75     | 0.031771                | 0.045591             | 0.05215              | 0.052175                | 0.091775                 |
| 0.8      | 0.035062                | 0.046076             | 0.052495             | 0.052747                | 0.099857                 |
| 0.85     | 0.038582                | 0.046743             | 0.052906             | 0.05363                 | 0.107966                 |
| 0.9      | 0.042274                | 0.047632             | 0.053434             | 0.054841                | 0.116102                 |
| 0.95     | 0.046095                | 0.048762             | 0.054118             | 0.056367                | 0.124261                 |
| 1        | 0.050018                | 0.050136             | 0.054985             | 0.05818                 | 0.132439                 |

**Таблиця 1.** Головні паспортні параметри двигунів

| Параметр                     | СДМЗ-2-22-34-60 УХЛ4 | СДС-19-46-40 УХЛ4 | СДС-19-56-40 УХЛ4 | СДМЗ-2-21-64-40 УХЛ4 | СДМЗ-2-24-59-80-УХЛ4 |
|------------------------------|----------------------|-------------------|-------------------|----------------------|----------------------|
| $P_n$ , кВт                  | 1600                 | 2000              | 2500              | 3150                 | 4000                 |
| $n_n$ , об/хв                | 100                  | 150               | 150               | 150                  | 75                   |
| $J_{дл}$ , кг·м <sup>2</sup> | 23250                | 12750             | 15000             | 19325                | 250000               |
| $J_n$ , кг·м <sup>2</sup>    | 6129                 | 2621              | 2621              | 5161.2               | 51612                |
| $M_n$ , в.о.                 | 0.832                | 0.863             | 0.856             | 0.859                | 0.853                |

$M_H = \frac{\Omega}{M_D}$  - відносний номінальний момент навантаження,  
де  $\Omega$  - базова кутова швидкість,  $M_D$  - базовий номінальний момент двигуна та середньоквадратичного

Для отриманих даних табл. 2 та 3 знайдені залежності у вигляді ліній тренду, які дозволяють залежно від типу двигуна і конкретного навантаження визначити бажаний рівень збудження, який забезпечить мінімум динамічного зусилля, що діє в обмотках якоря у момент прикладання максимально ударного навантаження. Універсальне рівняння поліномів має вигляд

$$y = a \cdot x^2 + b \cdot x + c \quad (2)$$

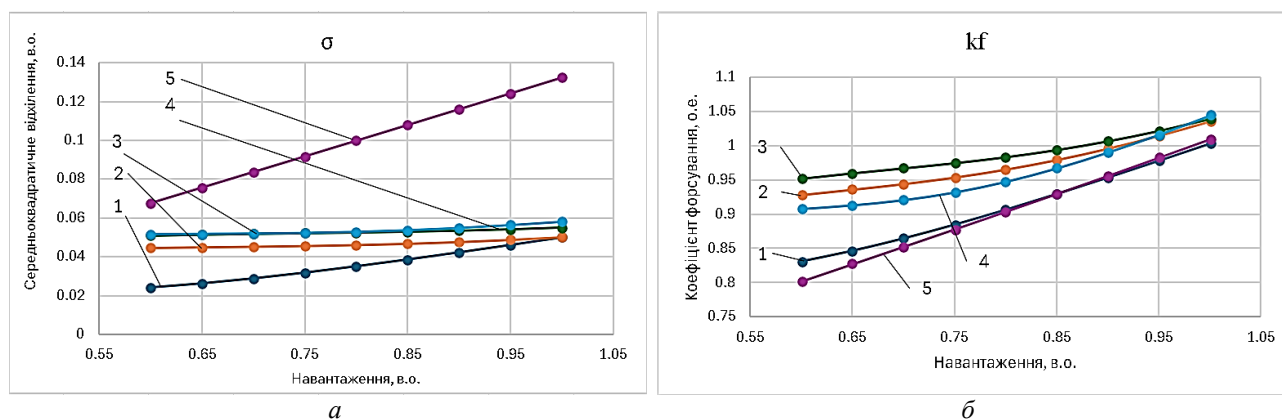
де  $y$  – функція пошуку,  $a, b, c$  – коефіцієнти;  $x$  – рівень навантаження в долях номінального, в.о.

Параметри коефіцієнтів, для отримання значень функції пошуку ( $K_f$  – кратність форсування збудження,  $\sigma$  – незміщене стандартне відхилення) та коефіцієнт детермінації полінома  $R^2$  зведені в табл. 4.

Таблиця 3. Матриця показника форсування збудження

| kf       |                         |                      |                      |                         |                          |
|----------|-------------------------|----------------------|----------------------|-------------------------|--------------------------|
| $k_{мс}$ | СДМЗ-2-22-34-60<br>УХЛ4 | СДС-19-46-40<br>УХЛ4 | СДС-19-56-40<br>УХЛ4 | СДМЗ-2-21-64-40<br>УХЛ4 | СДМЗ-2-24-59-80-<br>УХЛ4 |
| КОД      | 1                       | 2                    | 3                    | 4                       | 5                        |
| 0.6      | 0.830894                | 0.927888             | 0.951465             | 0.907494                | 0.801344                 |
| 0.65     | 0.846382                | 0.935692             | 0.959387             | 0.912831                | 0.826565                 |
| 0.7      | 0.864411                | 0.9439               | 0.966662             | 0.920353                | 0.851891                 |
| 0.75     | 0.884536                | 0.953432             | 0.974226             | 0.931503                | 0.87737                  |
| 0.8      | 0.906304                | 0.964984             | 0.982931             | 0.946932                | 0.903052                 |
| 0.85     | 0.929322                | 0.978948             | 0.993444             | 0.966515                | 0.928983                 |
| 0.9      | 0.953268                | 0.995424             | 1.006175             | 0.989637                | 0.955195                 |
| 0.95     | 0.977879                | 1.014286             | 1.021281             | 1.015507                | 0.981714                 |
| 1        | 1.00294                 | 1.035286             | 1.038709             | 1.043376                | 1.008551                 |

де  $k_{мс}$  – коефіцієнт рівня навантаження від номіналу



а) – середньоквадратичне відхилення (див. табл.2); б) – коефіцієнт форсування збудження (див. табл.3)

Рисунок 5. Фактичні результати моделювання

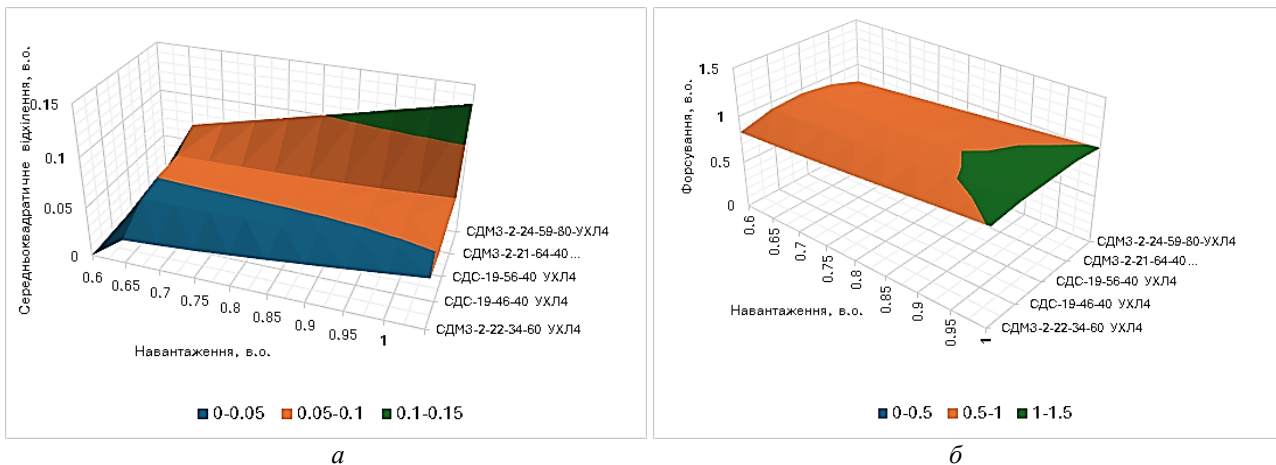
Таблиця 4. Параметри поліномів за типами двигунів і функції навантаження

| Двигун, тип          | Функція пошуку | Коефіцієнти поліному |         |         | $R^2$  |
|----------------------|----------------|----------------------|---------|---------|--------|
|                      |                | a                    | b       | c       |        |
| СДМЗ-2-22-34-60 УХЛ4 | Kf             | 0.2658               | 0.0097  | 0.7283  | 0.9998 |
|                      | $\sigma$       | 0.0503               | -0.0148 | 0.0147  | 0.9997 |
| СДС-19-46-40 УХЛ4    | Kf             | 0.413                | -0.3961 | 1.0179  | 0.9997 |
|                      | $\sigma$       | 0.0319               | -0.0378 | 0.0559  | 0.9968 |
| СДС-19-56-40 УХЛ4    | Kf             | 0.413                | -0.3961 | 1.0179  | 0.9997 |
|                      | $\sigma$       | 0.0109               | -0.008  | 0.0519  | 0.9919 |
| СДМЗ-2-21-64-40 УХЛ4 | Kf             | 0.709                | -0.7927 | 1.1279  | 0.9998 |
|                      | $\sigma$       | 0.0525               | -0.068  | 0.0736  | 0.9981 |
| СДМЗ-2-24-59-80-УХЛ4 | Kf             | 0.0473               | 0.4418  | 0.5193  | 1      |
|                      | $\sigma$       | 0.0048               | 0.1543  | -0.0266 | 1      |

Найбільш зручним для аналізу, протягом виконання досліджень, є побудова отриманих даних у вигляді функції двох змінних. Тому із табличного представлення функцій (табл. 2 і 3) побудовано у середовищі програмного продукту Excel розділу 3D діаграми рис. 6.

Щодо побудови автоматичних систем керування

збудженням синхронних приводів промислового типу необхідні значення форсування, як алгоритм керування мають бути завантажені у пам'ять контролера у вигляді таблиці до початку роботи привода. Вибір бажаного параметру форсування, як згадувалось, визначається типом двигуна та поточним навантаженням.



а) – середньоквадратичне відхилення; б) – рівень форсування

Рисунок 6. Графіки функцій пошуку задачі оптимізації

**Визначення параметрів складових автоматичної системи збудженням (етап 2).** За запропонованим алгоритмом побудови комбінованої системи керування етап 2 передбачає визначення сімейства характеристик, які включають рівні коефіцієнтів підсилення для задавача інтенсивності та ПІ-регулятора із корегованою ланкою інтегрування. Ці параметри суттєво визначають дію залишкової коливальності струму якоря, що також впливає на динамічне зусилля в обмотках двигуна.

Відомий вплив навантаження на параметри комплексної системи керування на першому етапі має тонке налагодження. Щодо параметрів регулятора та задавача інтенсивності, то їх налагодження виконано на максимальне навантаження, що гарантовано дозволить працювати системі збудження в найважчих умовах.

За поточних досліджень прийнято, що як і у попередніх розрахунках [31], кореговане значення підсилення інтегральної ланки взято у розмірі 22 % від розрахованого за модульним оптимумом.

Параметри автоматичної системи збудження визначено також за MathCAD-алгоритмом розв'язання оптимізаційної задачі. При цьому розрахункові рівняння мають вигляд:

Підсилення задавача інтенсивності

$$k_{iz} = \frac{r_f}{x_f - x_{ad}} \cdot \frac{x_{ad}}{x_{ed}} ; \tag{3}$$

підсилення пропорційної ланки ПІ-регулятора

$$k_p = \frac{T_d \cdot r_a}{2k_n \left[ x_{ad} \left[ \frac{1}{x_f - x_{ad}} \frac{x_{ad}}{x_{ed}} - \frac{x_{ad}}{x_{ed}} \cdot \frac{1}{x_f - x_{ad}} \frac{x_{ad}}{x_{ed}} \right] \right]} ; \tag{4}$$

підсилення інтегральної ланки ПІ-регулятора

$$k_i = \frac{r_a}{2k_n \left[ x_{ad} \left[ \frac{1}{x_f - x_{ad}} \frac{x_{ad}}{x_{ed}} - \frac{x_{ad}}{x_{ed}} \cdot \frac{1}{x_f - x_{ad}} \frac{x_{ad}}{x_{ed}} \right] \right]} \cdot k_{id} \cdot T_\mu , \tag{5}$$

де  $r_a, r_f$  – активний опір якоря і збудження, в.о.;  $x_{ad}, x_{ed}, x_f$  – реактивні опіри реакції якоря, розсіювання демпферної обмотки та обмотки збудження, в.о.;  $k_n, T_\mu$  – коефіцієнт підсилення та постійна часу перетворювача напруги, в.о.;  $T_d$  – електромагнітна постійна за віссю d, в.о.

Виходячи із визначених параметрів і моделі, яку побудовано на структурі рис. 3, виконано перевірку

працездатності синхронного привода.

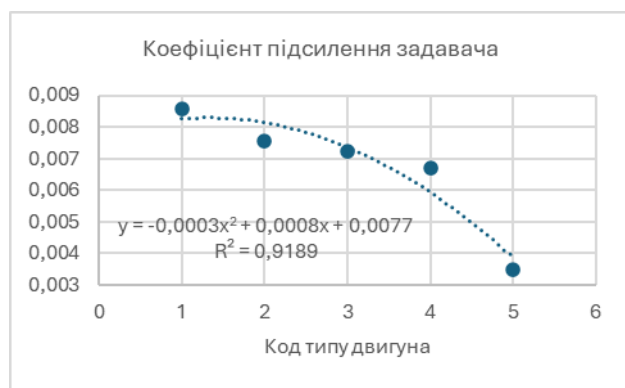
Кінцевий результат визначення кількісних значень коефіцієнтів підсилення при побудові ліній тренду ставляться у залежність від коду двигуна із переліку табл. 5.

Розрахунки, які проведені для кожного типу двигуна, дали змогу визначити увесь перелік необхідних коефіцієнтів системи керування синхронного приводу (табл. 5). На основі цих даних виконано побудову ліній тренду, що зображено на рис. 7. Усі діаграми мають рівняння математичного опису ліній тренду з оцінкою якості у вигляді коефіцієнта детермінації. Їх значення є таким, що дорівнюють величині 0,9, що цілком задовольняє рівню точності необхідного для технічних розрахунків.

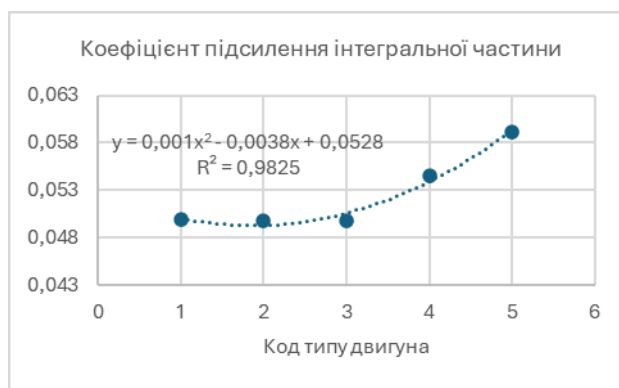
Проведений цикл досліджень свідчить про принципову можливість мінімізації динамічних зусиль в обмотках якоря для окресленого переліку електродвигунів. Як наслідок, це може сприяти захисту конструкцій синхронних приводів від аварій, пов'язаних із руйнуванням обмоток якоря, а дані можуть бути рекомендовані для використання у проектній та експлуатаційній практиці.

**Таблиця 5.** Відповідність типу двигуна, коду і коефіцієнтів підсилення

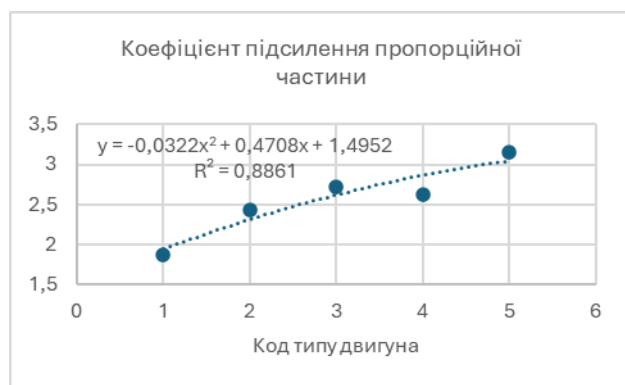
| Тип двигуна             | Код двигуна | Коефіцієнти підсилення                   |                                    |                                    |
|-------------------------|-------------|--|------------------------------------|------------------------------------|
|                         |             | к <sub>із</sub> , задавач інтенсивності. | к <sub>і</sub> , інтегр-на частина | к <sub>р</sub> , пропор-на частина |
| СДМЗ-2-22-34-60<br>УХЛ4 | 1           | 0.0086                                   | 0.0499                             | 1.8598                             |
| СДС-19-46-40<br>УХЛ4    | 2           | 0.0076                                   | 0.0498                             | 2.4228                             |
| СДС-19-56-40<br>УХЛ4    | 3           | 0.0072                                   | 0.0498                             | 2.7166                             |
| СДМЗ-2-21-64-40<br>УХЛ4 | 4           | 0.0067                                   | 0.0545                             | 2.6160                             |
| СДМЗ-2-24-59-80<br>УХЛ4 | 5           | 0.0035                                   | 0.0592                             | 3.1507                             |



а



б



в

Коефіцієнти підсилення а) – задавача; б) – інтегральної і в) – пропорційної частини

**Рисунок 7.** Результати цифрового експерименту

## V. ВИСНОВКИ

- Тенденція розвитку потужних технологічних машин металургійного та дробано-подрібнювального

циклу супроводжується впровадженням переважно синхронного приводу, який має абсолютно жорстку механічну характеристику. У цьому випадку, використання інерційних



компенсаторів ударних навантажень втрачає сенс, а відсутність системи депфування різко-змінних навантажень викликає суттєві динамічні зусилля в обмотках двигуна, що руйнує їх конструкцію.

- Попередніми дослідженнями встановлено, що відомі автоматичні системи керування збудженням синхронних двигунів неспроможні компенсувати екстремальні навантаження. Тому для досягнення мети компенсації ударних навантажень, система керування збудженням повинна працювати порізному на інтервалі екстремального збурення і на інтервалі залишкової коливальності.
- Оригінальна послідовність, яка успішно сприяє компенсації ударних навантажень, передбачає завчасне форсування напруги збудження, рівень якої визначається розв'язанням оптимізаційної задачі і відповідним налагодженням коефіцієнтів підсилення задавача інтенсивності та ПІ-регулятора збудження, який стабілізує повздовжній струм якоря.
- Механізми пластичної обробки металів застосовують виключно унікальні потужні електричні двигуни, де серією вважається побудова навіть двох електричних машин. Тому обраний перелік із п'яти серійних двигунів цілком може вважатись таким, що охоплює достатню кількість об'єктів для отримання узагальненого значення форсування та параметрів автоматичної системи керування збудженням.
- При визначенні узагальнених параметрів систем збудження встановлено, що пружність з'єднувальних муфт між двигуном та механізмом мають обмеження стосовно можливості їх регулювання, а на існуючих об'єктах – їх регулювання неможливе взагалі. Тому умови визначення узагальнених параметрів обмежено фактором впливу, який базується виключно на зміні напруги збудження при фіксації штатної пружності з'єднувальної муфти.
- Узагальнені параметри форсування суттєво залежать від типорозміру труби прокатки. Тому цей параметр оптимізації визначається із врахуванням ряду навантажень у межах від 0,6 до 1 номінального, чого цілком достатньо для охоплення усього можливого спектру.
- Узагальнені параметри підсилення задавача інтенсивності та ПІ-регулятора розраховуються для максимального навантаження, що забезпечить гарантовану працездатність системи збудження для найважчих умов.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Розробка рекомендацій з експлуатації синхронного двигуна головного приводу автомат-стану прокатки труб ООО «ІНТЕРПАЙП НІКО ТЬЮБ»: Звіт з НДР (заключ.) / Державний ВНЗ «НГУ»; Науково-дослідна робота виконана згідно договору №1120/030383 від 04.12.2012 м. - Дніпро, 2013. - 34 с. іл.
- [2] Гречаний О., Васильченко Т., Власов А., Кармазін М. Аналіз можливих шляхів підвищення продуктивності обладнання потокових ліній прокатних цехів / О. Гречаний, Т. Васильченко, А. Власов, М. Кармазін // Вісник Херсонського національного технічного університету. - 2021. - № 3. - С. 36-42. URL: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2021.3.4>.
- [3] Рахманов С.Р. Динаміка стрижневої системи механізму утримання оправки прошивного стану трубопрокатного агрегату / С. Рахманов // Матеріали Міжнародної конференції «Сучасні напрями виробництва зварних і безшовних труб із чорних і кольорових металів», Дніпропетровськ. - 2007. С.45 – 51.
- [4] Рахманов С.Р., Морозова Л.А. Динаміка лінії приводу стану гвинтової прокатки труб. / С. Р. Рахманов, Л.А Морозова // Вібрації в техніці та технологіях, 2009. - № 2 (54). - С. 76-82.
- [5] Рахманов С.Р. Дослідження динаміки процесу прошивки трубної заготовки на прошивному стані / С. Р. Рахманов // Вібрації в техніці та технологіях. - 2011. - № 1. - С. 46-52. - Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/vvtt\\_2011\\_1\\_10](http://nbuv.gov.ua/UJRN/vvtt_2011_1_10)
- [6] Рахманов С. Р., Лагутин Б. Н., Тополов В. Л., Байджанов С.М. Особливості функціонування і шляхи зниження динамічних навантажень в лінії приводу автоматичного стану трубопрокатного агрегату з зазором в зчленуваннях / С. Р. Рахманов, Б. Н. Лагутин, В. Л. Тополов, С.М. Байджанов // Вібрації в техніці та технологіях, 2013. - №(3), С. 85-91.
- [7] Рахманов С. Р. Особливості функціонування головної силової лінії автоматичного стану трубопрокатного агрегату з врахуванням зазорів в зчленуваннях / С. Р. Рахманов // Металургійна і гірничорудна промисловість. - 2015. - № 6. - С. 106-113. - Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/MGRP\\_2015\\_6\\_24](http://nbuv.gov.ua/UJRN/MGRP_2015_6_24)
- [8] Рахманов С. Р., Вишинський В. Т. Дослідження динаміки робочої кліти автоматичного стану трубопрокатного агрегату / С. Р. Рахманов, В. Т. Вишинський // Металургійна і гірничорудна промисловість. - 2018. - № 4. - С.74-80.
- [9] Балакін В.Ф., Перчаник В.В., Богдан Д.А., Угрюмов Ю.Д., Кадилишков С.В. Шляхи розвитку процесів гарячої прокатки труб / В.Ф. Балакін, В.В.Перчаник, Д.А.Богдан, Ю.Д.Угрюмов, С.В. Кадилишков // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць, 2018. - Випуск 3(116). – С.104–109.

- [10] Хацкелян І.П., Поворотній В.В., Вишинський В.Т., Рахманов С.Р. Дослідження напружено-деформованого стану робочої кліти автоматичного стану ТПА 350 із застосуванням інформаційних технологій / І.П.Хацкелян, В.В.Поворотній, В.Т.Вишинський, С.Р. Рахманов // Комп'ютерне моделювання: аналіз, управління, оптимізація. – 2019. – № 2 (6). – С.83-90.
- [11] Рахманов С. Р., Хацкелян І. П., Гармашов Д. Ю. Дослідження динаміки перехідних процесів на автоматичному стані трубопрокатного агрегату / С. Р.Рахманов, І. П.Хацкелян, Д. Ю Гармашов // Пластична деформація металів. – 2017. – С.203-209.
- [12] Рахманов С.Р., Поворотний В.В. Динаміка елементів робочої кліти автоматичного стану ТПА 350 / С.Р.Рахманов, В.В. Поворотний // *Металургійна та гірничорудна промисловість*, 2020. - № 1 – С.57-70. DOI: 10.34185/0543-5749.2020-1-57-7
- [13] Рахманов С.Р., Поворотний В.В. Дослідження динаміки елементів робочої кліти автоматичного стану ТПА 350 / С.Р.Рахманов, В.В. Поворотний // *Чорна металургія. Бюлетень науково-технічної і економічної інформації*. 2020. Т. 76. № 8. С. 830-840. Doi: 10.32339/0135-5910-2020-8-830-840
- [14] Поворотній В. В. Підвищення ефективності роботи станів холодної прокатки труб шляхом раціонального синтезу деталей робочих клітей: дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.05.08 - Машини для металургійного виробництва. Дніпро, 2021. 203 с.
- [15] Krot P., Prykhodko I., Raznosilin V., Zimroz R. Model Based Monitoring of Dynamic Loads and Remaining Useful Life Prediction in Rolling Mills and Heavy Machinery // Ball A., Gelman L., Rao B. (eds) *Advances in Asset Management and Condition Monitoring. Smart Innovation, Systems and Technologies*, 2020. - vol 166.
- [16] Krot P.V. Dynamics and diagnostics of the rolling mills drivelines with non-smooth stiffness characteristics / P.V. Krot // *Proc. of the 3rd Int. Conf. on Nonlinear Dynamic, ND-KhPI2010*, September 21-24, 2010, Kharkov, Ukraine. P. 115-120.
- [17] Райхман Э.Н. Стан та перспективи впровадження синхронного електропривода в металургії. М.: Інформелектро, ТС-8, 1980. - 51 с.
- [18] Демпфування ударних навантажень гірничо-металургійних механізмів засобами синхронного привода / Бородай В.А., Боровик Р.А., Котлярова Е.В. // *Гірничая електромеханіка та автоматика: Наук.-техн. зб.* – 2015. – Вип. 95. – С. 47-50.
- [19] Borodai V. Efficient Transient Modes of Synchronous Drive for Mining and Smelting Mechanisms [Текст] / V. Borodai, R. Borovyk, O. Nesterova. // *Mechanics, Materials Science & Engineering*. – 2017. – Vol.8. – No.8. – P. 133-142.
- [20] Бялобржеський О. В. Система керування динамічними режимами збудження синхронного двигуна / О. В. Бялобржеський, Д. В. Слободенюк / *Гірничая електромеханіка та автоматика : наук. - техн. зб.* / [гол. ред. Г. Г. Півняк] ; М-во освіти і науки, молоді та спорту України, Держ. вищий навч. закл. “Нац. гірн. ун-т” - Дніпропетровськ : НГУ, 2013. - Вип. 91. - С. 94-98. <http://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/158000>
- [21] Чугунов Д.В., Нізімов В.Б. Забезпечення стійкості роботи синхронних двигунів при посадці напруги в мережі або прикладанні значного навантаження / Д.В.Чугунов, В.Б. Нізімов // *Збірник наукових праць ДДТУ*, 2024. - № 2(45). С.112-116. <http://sj.dstu.dp.ua/article/view/318277/308644>
- [22] Хоменко В. І., Нізімов В. Б., Количев С. В. Підвищення стійкості роботи синхронної машини шляхом удосконалення системи збудження. / В. І.Хоменко, В. Б. Нізімов, С. В. Количев // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2015. - 1/8(73). – P. 31–36. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.36498>
- [23] Линьков С.А. Анализ систем управления синхронных электроприводов [Текст] / С.А. Линьков, А.С. Сарваров, І.В. Бачурін // *ЕСіК. Серія „Теорія і практика автоматизованого електропривода”*. – 2014. – №2(23). – С. 25-28.
- [24] Слободенюк Д.В. Ємнісний накопичувальний пристрій у контурі збудження синхронної машини для форсування та гасіння поля [Текст] / Д.В. Слободенюк, О.В. Бялобржеський // *Електротехніка і Електромеханіка*. – 2015. – №2. – С. 16-20.
- [25] Babaei M. Nonlinear feedback control of chaos in synchronous reluctance motor drive systems [Текст] / M. Babaei, J. Nazarzadeh, J. Faiz // *IEEE International Conference*. – 2008. – 4 p. doi: 10.1109/ICIT.2008.4608524.
- [26] Кириченко В.І. Програмно керований збудник синхронних двигунів [Текст] / В.І. Кириченко, М.І. Школа, В.В. Кириченко, Р.О. Боровик // *Наука та інновації*. – К., 2006. – Т2. №3. – С. 28-37.
- [27] Задорожня І.Н. Синтез електромеханічної системи граничної ступені стійкості і мінімальної коливальності пружної механічної підсистеми [Текст] / І.Н. Задорожня, Н.А. Задорожній // *Вісник НТУ «ХП»*. – 2017. – 27(1249). – С. 150-155.
- [28] Пат. 62904 Україна, МПК (2010) H02M 1/08. Спосіб випереджаючого коригування генератором, що працює на асинхронний двигун / В.М. Рябенський, О.О. Ушкаренко, О.Я. Дубовик, А.В. Крилов; Заявник і патентовласник НУК ім. акад. Макарова. Заяв. №U201100491 від 26 вересня 2011 р.

[29] Пат. 62906 Україна, МПК (2010) H02M 1/08. Спосіб випереджаючого коригування генератором, що працює на асинхронний двигун / В.М. Рябенський, О.О. Ушкаренко, О.Я. Дубовик; Заявник і патентовласник НУК ім. акад. Макарова. Заяв. №U201100496 від 26 вересня 2011 р.

[30] Пат. № 123955 Україна. СПОСІБ РЕГУЛЮВАННЯ ЗБУДЖЕННЯ СИНХРОННИХ МАШИН / О.С. Бешта, В.А. Бородай, О.В. Балахонцев, Р.О. Боровик; заявник і власник патенту НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ "ДНІПРОВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА"; опубл. Бюл. № 26 30.06.2021.

[31] Бородай В.А. Компенсація різко-змінного струму якоря потужних синхронних приводів засобами автоматичної системи збудження із нестандартним алгоритмом керування [Текст] / В.А. Бородай, Р.О. Боровик, О.Ю. Нестерова // Електротехніка та електроенергетика. – 2018. – № 1 – С. 72-80. DOI 10.15588/1607-6761-2018-1-8.

Надійшла (Received) 04.08.2025;

Прийнята (Accepted) 12.09.2025;

Опублікована (Published) 22.10.2025;

## GENERALIZED PARAMETERS OF THE EXCITATION SYSTEM OF A SYNCHRONOUS DRIVE WITH IMPACT LOAD

- BORODAI V.A.** Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electric Drive, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-7721-8752>, e-mail: [borodai.v.a@nmu.one](mailto:borodai.v.a@nmu.one);
- BOROVYK R.O.** Engineer, Senior Lecturer of the Department of Electric Drive, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5230-7747>, e-mail: [borovyk.r.o@nmu.one](mailto:borovyk.r.o@nmu.one);
- NESTEROVA O.YU.** PhD, Associate Professor, Head of the Department of Philosophy and Pedagogy, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine, <https://orcid.org/0000-0002-5952-4664>, e-mail: [Nesterova.O.Yu@nmu.one](mailto:Nesterova.O.Yu@nmu.one).

**Purpose.** To generalize the parameters of the original excitation control system for synchronous drives for the dissemination of their results to powerful production complexes operating in periodic shock load modes, which will contribute to the elimination of accidents due to the destruction of the electromagnetic system structure of synchronous machines of mechanisms of this type.

**Methodology.** The research used the provisions of the theory of electrical machines, the theory of automatic control, methods for solving optimization problems using the mathematical package MATHCAD, methods and techniques of structural modelling in the MATLAB environment of the SIMULINK component.

**Findings.** By solving the optimization problem, polynomial dependences of the forcing levels of the excitation system of the synchronous drive were obtained, taking into account the magnitude of the current load and the standard parameters of the elastic coupling, and also the parameters of the PI controller are determined with the refinement of the integral link coefficients, which allows avoiding excessive oscillations in the extreme load rollover process.

**Originality.** Taking into account the technological conditions of operation of the TPA-350 automatic machine tool for the production of solid-drawn pipes, an original sequence was proposed and polynomial dependences of the generalization of the main control parameters of the excitation system of a synchronous drive operating in the mode of periodic occurrence of extreme loads were obtained and the prospect of using this system as part of industrial exciters for powering inductor windings of powerful synchronous drives of metallurgical and crushing and grinding mechanisms is shown.

**Practical value.** The obtained polynomial dependences of the main parameters of the excitation control system for powerful synchronous drives make it possible to recommend specific forcing values to manufacturers and designers, parameters of the PI controller and the intensity setter, which will avoid expensive repairs and downtime of the machine, which are associated with significant financial costs.

**Keywords:** automatic state machine; powerful synchronous drive; excitation system; solution of optimization problem; mathematical and structural modelling; trend lines of generalized parameters.

### REFERENCES

[1] Development of recommendations for the operation of the synchronous motor of the main drive of the

automatic pipe rolling mill of OOO "INTERPIPE NIKO TUBE": Research report (final) [Rozrobka rekomendacij z ekspluataciji' synhron-nogo dvyguna

- golovnoho pryvodu avtomat-stanu prokatky trub ООО "INTERPAJP NIKO T"JuB": Zvit z NDR (zakljuch.). *State University "NGU"; Research work was carried out under contract No. 1120/030383 dated 04.12.2012 - Dnipro, 2013. - 34 p. ill.* (in Ukrainian).
- [2] Grechany O. M., Vasylenko T., Vlasov A. O., Karmazin M. O. (2021). Analysis of possible ways to increase the productivity of equipment of rolling mill production lines [Analiz mozhyvyh shljahiv pidvyshhennja produk-tyvnosti obladnannja potokovyh liniy prokatnyh cheviv]. *Bulletin of Kherson National Technical University*, 3, 36-42. (in Ukrainian).
- [3] Rakhmanov S.R. (2007). Dynamics of the rod system of the mandrel holding mechanism of the piercing mill of the pipe rolling unit. [Dynamika stryzhnevoi' systemy me-hanizmu utrymannja opravy proshyvnoho stanu truboprokatnogo agregatu]. *Materials of the International Conference "Modern Trends in the Production of Welded and Seamless Pipes from Ferrous and Nonferrous Metals", Dnipropetrovsk*, 76-82. (in Ukrainian).
- [4] Rakhmanov S.R., Morozova L.A. (2009). Dynamics of the drive line of a screw pipe rolling mill. [Dynamika liniy' pryvodu stanu gvyntovoi' prokatky trub.]. *Vibrations in Engineering and Technologies*, 2 (54), 76-82. (in Ukrainian).
- [5] Rakhmanov S.R. (2011). Research into the dynamics of the piercing process of a pipe billet on a piercing mill. [Doslidzhennja dynamiky procesu proshyvky trub-noi' zagotovky na proshyvnomu stani]. *Vibrations in Engineering and Technologies*, 1, 46-52. (in Ukrainian).
- [6] Rakhmanov, S.R., Lagutin, B.N., Topolov, V.L., & Baidzhanov, S.M. (2013). Features of functioning and ways to reduce dynamic loads in the drive line of an automatic pipe rolling unit with a gap in the joints. [Osoblyvosti funkcionuvannja i shljahy znyzhennja dynamichnyh navantazhen' v liniy' pryvoda avto-matychnogo stanu truboprokatnogo agregatu z za-zorom v zchlenuvannjah]. *Vibrations in Engineering and Technologies*, 3, 85-91. (in Ukrainian).
- [7] Rakhmanov, S.R. (2015). Features of the functioning of the main power line of the automatic pipe rolling unit, taking into account the gaps in the joints. [Osoblyvosti funkcionuvannja golovnoi' sylovoi' liniy' avtomatychnogo stanu truboprokatnogo agre-gatu z vrahuvannjam zazoriv v zchlenuvannjah] *Metallurgical and mining industry*, 6, 106-113. (in Ukrainian).
- [8] Rakhmanov S. R., Vyshinsky V. T. (2018). Research on the dynamics of the working stand of an automatic pipe rolling mill [Doslidzhennja dynamiky robochoi' kliti avtomatych-nogo stanu truboprokatnogo agregatu]. *Metallurgical and mining industry*, 4, 74-80. (in Ukrainian).
- [9] Balakin V.F., Perchanyk V.V., Bohdan D.A., Ugryumov Yu.D., Kadilyshkov S.V. (2018). Development paths of hot pipe rolling processes [Shljahy rozvytku procesiv garjachoi' prokatky trub]. *System technologies. Regional interuniversity collection of scientific papers, Dnipro*, 3(116), 104–109. (in Ukrainian).
- [10] Khatskelyan I.P., Povоротny V.V., Vyshinsky V.T., Rakhmanov S.R. (2019). Doslidzhennja napruzhenno-deformovanogo stanu robochoi' kliti avtomatychnogo stanu TPA 350 iz zastosuvannjam informacijnyh tehnologij. [Doslidzhennja napruzhenno-deformovanogo stanu robochoi' kliti avtomatychnogo stanu TPA 350 iz zastosuvannjam informacijnyh tehnologij]. *Computer modeling: analysis, control, optimization*, 2 (6,83-90. (in Ukrainian).
- [11] Rakhmanov S.R., Hatskelyan I.P., Harmashov D.Yu. (2017). Study of the dynamics of transient processes on an automatic stand of a pipe rolling unit [Doslidzhennja dynamiky perehidnyh procesiv na avtomatychnomu stani truboprokatnogo agregatu]. *Plastic deformation of metals*. 203-2209. (in Ukrainian).
- [12] Rakhmanov S.R., Povortny V.V. (2020). Dynamics of the working frame elements of the automatic state TPA 350 [Dynamika elementiv robochoi' kliti avtomatychno-go stanu TPA 350]. *Metallurgical and mining industry*, 1, 57-70. (in Ukrainian).
- [13] Rakhmanov S.R., Povortnyi V.V. (2020). Study of the dynamics of the working frame elements of the automatic mill TPA 350 [Doslidzhennja dynamiky elementiv robochoi' kliti avtomatychnogo stanu TPA 350]. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 76, 8, 830-840. (in Ukrainian).
- [14] Povortny V.V. (2021). Increasing the efficiency of cold pipe rolling mills through rational synthesis of work stand parts [Pidvyshhennja efektyvnosti roboty staniv holod-noi' prokatky trub shljahom racional'nogo synte-zu detalej robochyh klitej], *dis. ... candidate of technical sciences: special. 05.05.08 - Machines for metallurgical production. Dnipro*, 203. (in Ukrainian).
- [15] Krot, P., Prykhodko, I., Raznosilin, V., Zimroz, R. (2020). Model Based Monitoring of Dynamic Loads and Remaining Useful Life Prediction in Rolling Mills and Heavy Machinery. In: Ball, A., Gelman, L., Rao, B. (eds) *Advances in Asset Management and Condition Monitoring. Smart Innovation, Systems and Technologies*, vol 166. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-57745-2\\_34](https://doi.org/10.1007/978-3-030-57745-2_34)
- [16] Krot, P.V. (2010). Dynamics and diagnostics of the rolling mills drivelines with non-smooth stiffness characteristics. *Proc. of the 3rd Int. Conf. on Nonlinear Dynamic, ND-KhPI2010, September 21-24, 2010, Kharkov, Ukraine.*, 115-120. (in

- Ukrainian).
- [17] Reichman, E.N.(1980). Status and prospects of implementing synchronous electric drives in metallurgy [Stan ta perspektyvy vprovadzhenja synhronnogo elektropyvoda v metalurgii']. *M.: Informelektro, TS-8, 51.* (in Russian).
- [18] Boroday V.A., Borovyk R.O., Kotlyarova E.V. (2015). Damping of shock loads of mining and metallurgical mechanisms by means of a synchronous drive [Dempfovannja udarnyh navantazhen' girnycho-metalurgijnyh mehanizmiv zasobamy synhronno-go pryvoda]. *Mining electromechanics and automation: Scientific and technical collection, 95, 47-50.* (in Ukrainian).
- [19] Borodai V., Borovyk R., Nesterova O. (2017). Efficient Transient Modes of Synchronous Drive for Mining and Smelting Mechanisms. *Mechanics, Materials Science & Engineering. Vol.8,8, 133-142.* (in Austrian).
- [20] Byalobrzesky, O. V., Slobodenyuk D. V. (2013). Dynamic excitation control system for a synchronous motor [Systema keruvannja dynamichnymy rezhymamy zbudzhennja synhronnogo dvyguna]. *Mining electromechanics and automation: scientific - technical collection / [ed. chief. G. G. Pivnyak]; Ministry of Education and Science, Youth and Sports of Ukraine, State Higher Educational Institution "National Mining University" - Dnipropetrovsk: NGU, 91, 94-98.* (in Ukrainian).
- [21] Chugunov D.V., Nizimov V.B. (2024). Ensuring the stability of synchronous motors during voltage drops in the network or when applying a significant load [Zabezpechennja stijkosti roboty synhronnyh dvyguniv pry posadci naprugi v merezhi abo prykladanni znachnogo navantazhennja]. *Collection of scientific works of DSTU, 2(45),112-116.* (in Ukrainian).
- [22] Khomenko, V. I., Nizimov, V. B., & Kolychev, S. V. (2015). Increasing the stability of the synchronous machine by improving the excitation system. [Pidvyshhennja stijkosti roboty synhronnoi' ma-shyny shljahom udoskonalennja systemy zbudzhennja]. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 1/8(73), 31–36.* (in Ukrainian).
- [23] Linkov S.A., Sarvarov A.S., Bachurin I.V. (2014). Analysis of control systems for synchronous electric drives [Analiz system upravlinnja synhronnyh elektropyvodiv]. *ESiK. Series "Theory and Practice of Automated Electric Drive", 2(23), 25-28.* (in Ukrainian).
- [24] Slobodenyuk D.V., Bialobrzhesky O.V. (2015). Capacitive storage device in the excitation circuit of a synchronous machine for field forcing and quenching. [Jemnisnyj nakopychuval'nyj prystrij u konturi zbudzhennja synhronnoi' mashyny dlja forsuvannja ta gasinnja polja]. *Electrical Engineering and Electromechanics, 2, 16-20.* (in Ukrainian).
- Ukrainian).
- [25] Babaei M., J. Nazarzadeh, J. Faiz. (2008). Nonlinear feedback control of chaos in synchronous reluctance motor drive systems. *IEEE International Conference, 4.* (in Russian).
- [26] Kyrychenko V.I., Shkola M.I., Kyrychenko V.V., Borovyk R.O. (2006). Program-controlled exciter for synchronous motors [Programno kerovanyj zbudnyk synhronnyh dvyguniv]. *Science and Innovation, – K., T2, 3, 28-37.* (in Ukrainian).
- [27] Zadorozhnyia I.N., Zadorozhnyi N.A. (2017). Synthesis of an electromechanical system with a limiting degree of stability and minimal oscillation of an elastic mechanical subsystem [Syntez elektromehanichenoi' systemy granychnoi' stupeni stijkosti i minimal'noi' kolyval'nosti pruzhnoi' mehanichnoi' pidsystemy]. *Bulletin of NTU "KhPI", 27(1249), 150-155.* (in Ukrainian).
- [28] Ryabenkyi V.M., Ushkarenko O.O., Dubovik O.Ya., Krylov A.V. (2010). Pat. 62904 Ukraine, MPK (2010) H02M 1/08. Method of forward correction by a generator operating on an asynchronous motor [Pat. 62904 Ukrai'na, MPK (2010) N02M 1/08. Sposib vyperedzhajuchogo koryguvannja genera-torom, shho pracjuje na asynhronnyj dvygun]. *Applicant and patent owner: NUK named after Acad. Makarov. Application No. U201100491 dated September 26, 2011.* (in Ukrainian).
- [29] Ryabenky V.M., Ushkarenko O.O., Dubovyk O.Ya. (2010). Pat. 62906 Ukraine, MPK (2010) H02M 1/08. Method of forward correction by a generator operating on an asynchronous motor [Pat. 62906 Ukrai'na, MPK (2010) N02M 1/08. Sposib vyperedzhajuchogo koryguvannja genera-torom, shho pracjuje na asynhronnyj dvygun]. *Applicant and patent owner: NUK named after Acad. Makarov. Application No. U201100496 dated September 26, 2011.* (in Ukrainian).
- [30] Beshta O.S., Borodai V.A., Balakhontsev O.V., Borovyk R.O. (2021). Pat. No. 123955 Ukraine. Method of regulating excitation of synchronous machines [Pat. № 123955 Ukrai'na. Sposib reguljuvannja zbudzhennja synhronnyh mashyn]. *Applicant and patent owner National technical university "dnipro polytechnic"; publ. Bull. No. 26 06.30.2021.* (in Ukrainian).
- [31] Boroday V.A., Borovyk R.O., Nesterova O.Yu. (2018). Compensation of sharply alternating armature current of powerful synchronous drives by means of an automatic excitation system with a non-standard control algorithm [Kompensacija rizko-zminnogo strumu jakorja potuzhnyh synhronnyh pryvodiv zasobamy avtomatychnoi' systemy zbudzhennja iz nestandardnym alorytmom keruvannja]. *Electrical Engineering and Power Engineering, 1, 72-80.* (in Ukrainian).

УДК 621.31

## SPECIFIC FEATURES OF MODELING DISTRIBUTED GENERATION WITHIN ELECTRICAL NETWORK STRUCTURES USING DIFFERENT SOFTWARE PACKAGES

SMIRNOV D.V.

Postgraduate student, Department of Electric Power Transmission, Educational and Scientific Institute of Power Engineering, Electronics and Electromechanics, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute” Kharkiv, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-3509-8288>

E-mail: [Dmytro.Smirnov@iee.khpi.edu.ua](mailto:Dmytro.Smirnov@iee.khpi.edu.ua);

DANYLCHENKO D.O.

PhD (Eng.), Associate Professor, Professor of the Department of Electric Power Transmission, Educational and Scientific Institute of Power Engineering, Electronics and Electromechanics, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute” Kharkiv, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7912-1849>,

E-mail: [Dmytro.Danylchenko@khpi.edu.ua](mailto:Dmytro.Danylchenko@khpi.edu.ua)

**Purpose.** *The purpose of this study is to investigate the specific features of modeling distributed generation in the structure of electrical networks using different software packages. The work aims to identify the software that provides the necessary functionality, accuracy of calculations, ease of use, and license availability, while also considering the specific characteristics of Ukrainian electrical networks.*

**Methodology.** *Analysis of literary sources — applied to study the current state of the problem of distributed generation integration into electrical networks and to summarize both international and Ukrainian experience.*

*Comparative analysis — carried out to evaluate the functional capabilities of PowerFactory, Dakar Eleks, Matlab/Simulink, and Ansys according to the following criteria: modeling accuracy, computational performance, interface usability, availability of model libraries of distributed generation, the ability to model active and reactive power characteristics, voltage control characteristics, synchronization modes, and transient processes.*

**Findings.** *The key technical aspects of connecting distributed generation were identified, including the modeling of active and reactive power characteristics, voltage control characteristics, synchronization modes, transient processes, and automatic reconnection in accordance with the requirements of the Distribution System Code and the Transmission System Code. A comparative analysis of the functional capabilities of PowerFactory, Dakar Eleks, Matlab/Simulink, and Ansys was performed. International experience with the use of these software tools and the features of their adaptation to Ukrainian regulatory requirements were also analyzed.*

**Originality.** *A new approach is proposed for evaluating software packages for modeling the connection of distributed generation, which takes into account the specific features of Ukrainian electrical networks and the requirements of the Distribution System Code and the Transmission System Code.*

**Practical value.** *The results of this study can be applied in the process of selecting software for modeling the integration of distributed generation in Ukrainian electrical networks. The proposed approach makes it possible to reasonably determine optimal connection points, assess the influence of distributed generation on the operating conditions of the power system, and improve the efficiency of network development planning.*

**Keywords:** *modeling; distributed generation; electrical networks; integration; voltage regulation; network stability.*

### I. INTRODUCTION

The integration of distributed generation (DG) into existing electrical networks is one of the key directions in the development of modern power systems. The growing share of renewable energy sources (RES), particularly solar power plants (SPP) and wind power plants (WPP), requires the adaptation of the traditional power system to new operating conditions. The use of DG makes it possible to reduce transmission losses, improve the reliability of power supply, and ensure greater flexibility in managing network operating modes.

At the same time, the implementation of DG is accompanied by a number of technical challenges. Among them are the need to ensure voltage stability, coordinate the operation of distributed sources, adapt protection and control systems, as well as maintain power balance under variable load conditions. Special attention must be given to the determination of optimal connection points for DG to existing networks, which requires the use of modern modeling tools.

In international practice, software packages such as PowerFactory, Matlab/Simulink, and Ansys are widely

used, while in Ukraine the domestic solution Dakar Eleks is actively developing. Despite the considerable experience of foreign developments, there remains a need to assess their compliance with Ukrainian regulatory requirements, in particular the Distribution System Code (DSC) [1] and the Transmission System Code (TSC) [2].

The relevance of this study is determined by the necessity to strengthen the energy security of Ukraine, reduce dependence on centralized energy sources, and promote the development of decentralized solutions. In this context, particular importance is attached to studying the problems of modeling the integration of DG into the structure of electrical networks using different software packages and determining their suitability for practical application under the conditions of the national power system.

## II. ANALYSIS OF RESEARCH AND PUBLICATIONS

The issue of integrating distributed generation (DG) into electrical networks has been actively studied in scientific literature over the past decades. Early research was mainly focused on the impact of DG on network operating modes, particularly on changes in the direction of power flows and voltage levels in distribution systems [3–6]. With the development of renewable energy sources (RES) and digital technologies, new challenges have emerged, including voltage regulation, coordination of decentralized sources, and ensuring the stability and reliability of the power system.

In international practice, significant contributions were made by scholars such as T. Ackermann, M. Hatziargyriou, and R. Lasseter, who analyzed technical problems of DG integration, including modeling stability and power quality [7–10]. In parallel, the development of specialized software tools for modeling took place: PowerFactory is widely used in Europe for network development planning, Matlab/Simulink in scientific research for simulation modeling, and Ansys for high-precision analysis of electromagnetic processes. In Ukraine, a domestic approach has been emerging in recent years, particularly through the use of the software package Dakar Eleks, which is oriented toward the needs of distribution system operators.

Ukrainian researchers (I.I. Ivanenko, P.P. Petrov, O.M. Kovalchuk) [11] address the adaptation of international experience to the conditions of the Ukrainian power system, emphasizing the specifics of the regulatory framework defined by DSC [1] and TSC [2].

Despite the significant number of scientific publications, the issue of a comprehensive comparison of software packages in the context of their compliance with Ukrainian conditions remains insufficiently explored. Most studies focus either on the technical aspects of DG integration or on foreign solutions, while systematic evaluation of software tools suitable for practical application in Ukraine is almost absent.

This article aims to summarize the available experience, conduct a critical analysis of the capabilities of the most widely used software packages (PowerFactory, Dakar Eleks, Matlab/Simulink, Ansys), and develop well-grounded recommendations regarding their application in the Ukrainian power system. Special attention is paid to the ability of these tools to provide modeling of such key aspects of DG integration as voltage regulation, synchronization and transient processes, modeling of P–Q and U–Q characteristics, as well as determining optimal connection points considering the real constraints of the power system. Additionally, their compliance with DSC [1] and TSC [2] requirements, interface usability, the availability of generation source model libraries, and the scalability of calculations from local microgrids to regional systems are analyzed. This approach makes it possible not only to systematize the advantages and limitations of individual software solutions but also to outline directions for further improvement of DG integration modeling methods under the conditions of the Ukrainian power system.

## III. AIM OF THE STUDY

The aim of this study is to provide a substantiated determination of the software package that can be most effectively applied for modeling the integration of DG into the existing electrical networks of Ukraine. The task is to select a software tool that meets the technical and regulatory requirements of the DSC and the TSC, while ensuring sufficient modeling accuracy, functionality, and practical accessibility.

The desired outcomes of the study are:

- a comparative analysis of the software packages PowerFactory, Dakar Eleks, Matlab/Simulink, and Ansys;
- identification of their advantages and limitations in the context of DG integration modeling;
- assessment of the compliance of software functionality with current DSC and TSC requirements;
- development of well-grounded recommendations regarding the choice of software for practical application in the Ukrainian energy sector.

The criteria for evaluating the quality of the results are:

- compliance of the selected software with modern technical standards and regulatory documents;
- feasibility of practical implementation under the conditions of the Ukrainian power system;
- potential to enhance reliability, efficiency, and stability of networks with integrated DG.

The limitations of the study lie in its focus on the technical aspects of DG integration into medium- and low-voltage distribution networks, without a detailed analysis of economic or regulatory factors.

#### IV. PRESENTATION OF THE MAIN MATERIAL AND ANALYSIS OF THE RESULTS

In the course of the study, a number of scientific and technical works dedicated to the integration of DG into electrical networks were analyzed. Ukrainian authors [11–12] emphasize the prospects for the development of decentralized generation in Ukraine, particularly based on renewable energy sources. The studies highlight both the advantages of DG deployment (loss reduction, improved reliability, decreased dependence on centralized generation) and the barriers: voltage instability, limited automation, and insufficient experience in adapting international solutions.

The research of DIXI Group (2023) [13] stresses the need for the Ukrainian power system to develop highly maneuverable capacities for balancing unstable renewable generation. As an intermediate step, the development of gas-fired generation and energy storage systems is proposed. At the same time, in the EU countries the introduction of Smart Grid technologies and digital management platforms has demonstrated the effectiveness of comprehensive DG integration [8, 10].

The integration of DG into existing electrical networks requires a set of calculations to ensure technical and regulatory compliance of new sources with the requirements of the DSC and TSC. Connection of renewables is possible both in the form of large-scale industrial plants (solar and wind farms) connected at the 35–750 kV level, and as local solutions for self-consumption — private households, enterprises, agricultural facilities, or remote villages. In each case, it is necessary to determine the optimal connection capacity and verify its impact on the network.

The general procedure of calculation includes the following steps:

##### Collection of input data:

- Electrical network diagram and parameters;
- Consumer load profiles (average and peak);
- Characteristics of generation sources (rated power, inverter modules, reactive power control range).

##### Base case simulation:

- Network operation without DG — determining baseline parameters (loads, losses, voltage levels);
- Selection of potential connection points considering line capacity, acceptable voltage deviations, and stability.

##### DG integration modeling:

- Analysis of voltage impact, power flows, and reactive power control.

##### Verification of compliance with DSC and TSC:

- Fault ride-through capability (LVRT/FRT);
- Participation in frequency and voltage control;
- Compliance with power quality standards.

##### Optimization and recommendations:

- Optimization of connection capacity based on simulation results and possible grid constraints;
- Preparation of recommendations for technical connection conditions.

Taking into account the above, this study carried out a comparative analysis of the most commonly used software packages in international and domestic practice for modeling DG connection: PowerFactory, Dakar Eleks, Matlab/Simulink, and Ansys. The analysis was performed with reference to the requirements of the DSC and TSC, which define the parameters of new generation connections, acceptable operating modes, and network stability requirements.

**PowerFactory** (DIgSILENT, Germany) [14] is one of the most recognized tools worldwide for power system analysis. It has extensive libraries of generator, transformer, and control system models. Its main advantage lies in high accuracy in power flow and transient simulations. Within the Ukrainian context, PowerFactory allows modeling of DG connection scenarios with consideration of DSC requirements (permissible connection points, voltage mode analysis) and TSC requirements (impact on power transmission and frequency stability). The disadvantages are high license costs and complex adaptation for smaller Distribution System Operators (DSOs).

**Dakar Eleks** [15] is a Ukrainian software package focused on modeling medium- and low-voltage networks. Its key feature is integration with Ukrainian regulatory documents, including the DSC, which simplifies calculations in line with national standards. The program supports P–Q and U–Q modeling, voltage stability analysis, calculation of optimal DG connection points, and preparation of feasibility studies (FS). A major advantage is the availability of a free license, making it attractive for universities and research institutions. Compared with PowerFactory or Matlab, Dakar Eleks is less detailed in transient processes but is optimal for applied tasks in Ukrainian conditions.

**Matlab/Simulink** [16] is widely used in research for modeling nonlinear processes, developing control systems, and studying flexible network operation modes. The SimPowerSystems and Simscape Electrical toolboxes allow simulation of solar and wind plants, storage systems, and inverter devices. In terms of DSC and TSC compliance, Matlab provides high accuracy of transient modeling and is indispensable for studying control and regulation algorithms. However, its practical use by DSOs is limited due to high license costs, complexity of integration with real grid databases, and lack of built-in FS modules.

**Ansys** (USA) [17] is a powerful tool for modeling electromagnetic and thermal processes. In the field of DG, it is mainly applied for detailed analysis of electrical machines, cables, transformers, and inverters. Its strength lies in the ability to reproduce complex electromagnetic phenomena, allowing assessment of equipment reliability and safety. However, it is not specialized for system-level



modeling of distribution networks, which limits its application for DG connection studies.

To evaluate the capabilities of these software tools, a test case was defined:

- 110/35/10 kV network model with 20 nodes;
- Connection of a 20 MW solar plant to a 35 kV bus;
- Simulation of a transient process with a 20% voltage drop lasting 150 ms (LVRT test).

Four parameters were assessed:

- Modeling accuracy (difference compared with benchmark analytical calculations).

- Calculation time (on a PC with i7 processor, 16 GB RAM).

- Hardware requirements (minimum resources for stable performance).

- Software specialization

The results of the analysis are summarized in a table and presented in Table 1.

**Table 1.** Comparison of software packages based on the test case

| Evaluation criterion               | Power Factory                          | Dakar Eleks                                  | Matlab                                  | Ansys  |
|------------------------------------|--|--|---|--|
| Accuracy of calculation (error, %) | 1-2 %                                  | 0.5-1 %                                      | 1-2 %                                   | <1 %<br>(for local elements, not system-level) |
| Calculation time (s)               | ~15 s                                  | ~10 s  | ~25 s                                   | ~40 s  |
| Minimum hardware requirements      | Core i7, 8 GB RAM                      | Core i5, 4 GB RAM                            | Core i7, 16 GB RAM                      | Core i9, 32 GB RAM + GPU                       |
| Specialization                     | System analysis, stability, power flow | Connection optimization, Ukrainian standards | Control algorithms, nonlinear processes | High-precision equipment analysis              |

By most criteria (calculation accuracy, compliance with regulatory requirements, accessibility, integration with databases), Dakar Eleks demonstrates the optimal balance of capabilities and practical value for Ukraine. PowerFactory and Matlab surpass it in terms of accuracy and flexibility but fall short in accessibility and ease of practical implementation. Ansys remains a highly specialized tool.

Thus, the analysis confirms that Dakar Eleks provides the best balance between functionality and practical value under Ukrainian conditions, while PowerFactory and Matlab offer higher accuracy and flexibility but are more expensive and harder to use. Ansys remains useful for narrow, specialized tasks.

## V. CONCLUSIONS

This study provides a comprehensive assessment of the integration DG into Ukraine's power distribution networks and yields the following key findings:

**Current Challenges Identified:** The analysis of the present state of DG integration in Ukraine revealed critical technical challenges, including voltage stability, reactive power control, compliance with the Distribution and Transmission System Codes, and the adaptation of control and protection systems.

**Review of International and National Practices:** A synthesis of international [3–10] and national [11–13] experience demonstrated the effectiveness of advanced software tools for modeling DG connection processes.

**Proposed Calculation Framework:** A structured methodology for determining the optimal DG connection

capacity was developed. It encompasses data collection, network operating mode analysis, scenario-based integration modeling, and regulatory compliance verification.

**Comparative Software Analysis:** A comparative evaluation of four software platforms—PowerFactory, Dakar Eleks, Matlab/Simulink, and Ansys—was conducted based on calculation accuracy, modeling capabilities, compliance with regulatory codes, and usability.

**Recommended Solution for Ukraine:** The findings indicate that Dakar Eleks offers the most suitable solution under Ukrainian conditions, providing essential functionality, integration with national standards, and free license availability. This makes it applicable for both academic research and practical operations by distribution system operators.

**Practical Implications:** The results can be utilized to enhance network planning and design processes, improve the efficiency of renewable energy integration, and support the development of policy and regulatory recommendations in the energy sector.

## REFERENCES

- [1] Distribution System Code. Resolution of the NEURC No. 310 dated 14.03.2018.
- [2] Transmission System Code. Resolution of the NEURC No. 309 dated 14.03.2018.
- [3] IEEE Standards Association. (2018). IEEE Std 1547-2018 — Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces.

- [4] Liu, Z., et al. (2020). Resilient distribution system leveraging distributed generation and microgrids: A review. IET Energy Systems Integration. <https://doi.org/10.1049/iet-esi.2019.0134>
- [5] Brown, T., Hörsch, J., & Schlachtberger, D. (2017). PyPSA: Python for power system analysis. arXiv preprint, arXiv:1707.09913.
- [6] Mishra, S., Pohl, J., Laws, N., Cutler, D., Kwasnik, T., Becker, W., Zolan, A., Anderson, K., Olis, D., & Elgqvist, E. (2020). Computational framework for behind-the-meter DER techno-economic modeling and optimization — REopt Lite. arXiv preprint, arXiv:2008.05873.
- [7] Ackermann T., Andersson G., Söder L. Distributed generation: a definition. Electric Power Systems Research. 2001. Vol. 57. P. 195–204.
- [8] Hatziargyriou N., Asano H., Iravani R., Marnay C. Microgrids. IEEE Power and Energy Magazine. 2007. Vol. 5(4). P. 78–94.
- [9] Smith J., Lopes J.A.P., Hatziargyriou N. Stability issues in distribution networks with distributed generation. IEEE Transactions on Power Systems. 2022. Vol. 37(4). P. 2561–2572.
- [10] Lopes J.A.P., Moreira C., Madureira A. Defining control strategies for microgrids islanded operation. IEEE Transactions on Power Systems. 2021. Vol. 26(2). P. 916–924.
- [11] Kovalchuk, O.M., Ivanenko, I.I., Petrov, P.P. Adaptation of international approaches to distributed generation integration under Ukrainian conditions. Bulletin of Energy and Electrical Engineering. 2022. No. 2. P. 40–47.
- [12] Cherniuk, A.M., Kyrysov, I.H., Chervyk, Yu.O. Prospects for integrating renewable energy sources into Ukraine's power grids. Energy and Electrification. 2021. No. 5. P. 24–31.
- [13] DIXI Group. Balancing Ukraine's power system: challenges and solutions. Analytical report. Kyiv, 2023.
- [14] DIGSILENT PowerFactory Documentation. DIGSILENT GmbH. [Online resource]. Available at: <https://www.digsilent.de>
- [15] Dakar Eleks. Official website of the software package. [Online resource]. Available at: <https://eleks.com>.
- [16] Matlab/Simulink Documentation. MathWorks. [Online resource]. Available at: <https://www.mathworks.com/products/simulink.html>
- [17] Ansys Electronics Desktop Documentation. Ansys Inc. [Online resource]. Available at: <https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-electronics-desktop>

Надійшла (Received) 15.06.2025;

Прийнята (Accepted) 17.08.2025;

Опублікована (Published) 22.10.2025;

## ОСОБЛИВОСТІ ПРОБЛЕМИ МОДЕЛЮВАННЯ РОЗПОДІЛЕНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ В СТРУКТУРІ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ ЗА ДОПОМОГОЮ РІЗНИХ ПРОГРАМНИХ КОМПЛЕКСІВ

СМІРНОВ Д.В.

аспірант кафедри передача електричної енергії навчально-наукового інституту енергетики, електроніки та електромеханіки, Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-3509-8288>, e-mail: Dmytro.Smirnov@ieee.khpi.edu.ua;

ДАНИЛЬЧЕНКО Д.О.

канд. техн. наук, доцент, професор кафедри передача електричної енергії навчально-наукового інституту енергетики, електроніки та електромеханіки, Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7912-1849>, e-mail: Dmytro.Danylchenko@khpi.edu.ua

**Мета роботи.** Метою даної роботи є дослідження особливостей моделювання розподіленої генерації в структурі електричних мереж із використанням різних програмних комплексів. Робота спрямована на визначення програмного забезпечення, яке забезпечує необхідний функціонал, точність розрахунків, зручність використання та доступність ліцензії, а також дозволяє врахувати специфіку українських електричних мереж.

**Методи дослідження.** Аналіз літературних джерел — для вивчення сучасного стану проблеми інтеграції розподіленої генерації в електричні мережі, а також для узагальнення міжнародного та українського досвіду. Порівняльний аналіз — виконано оцінку функціональних можливостей PowerFactory, Dakar Eleks, Matlab/Simulink та Ansys за критеріями: точність моделювання, швидкодія, зручність інтерфейсу, наявність бібліотек моделей РГ, можливості моделювання P-Q та U-Q характеристик, режимів синхронізації та перехідних процесів.

**Отримані результати.** Визначено ключові технічні аспекти приєднання розподіленої генерації, включаючи моделювання P-Q та U-Q характеристик, режими синхронізації, перехідні процеси та автоматичне повторне

підключення відповідно до вимог Кодексу системи розподілу та Кодексу системи передачі. Проведено порівняння функціональних можливостей програмних комплексів PowerFactory, Dakar Eleks, Matlab/Simulink та Ansys. Проаналізовано міжнародний досвід застосування зазначених програмних засобів та особливості їх адаптації до українських нормативних вимог.

**Наукова новизна.** Запропоновано новий підхід до оцінювання програмних комплексів для моделювання підключення РГ, який враховує специфіку українських електричних мереж та вимоги Кодексу системи розподілу та Кодексу системи передачі.

**Практична цінність.** Результати дослідження можуть бути використані при виборі програмного забезпечення для моделювання інтеграції розподіленої генерації в українських електричних мережах. Запропонований підхід дозволяє обґрунтовано визначати оптимальні точки приєднання, оцінювати вплив розподіленої генерації на режими роботи енергосистеми та підвищувати ефективність планування розвитку мереж.

**Ключові слова:** моделювання, розподілена генерація; електричні мережі; інтеграція; регулювання напруги; стабільність мережі.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Кодекс системи розподілу. Постанова НКРЕКП №310 від 14.03.2018 р.
- [2] Кодекс системи передачі. Постанова НКРЕКП №309 від 14.03.2018 р.
- [3] IEEE Standards Association. (2018). IEEE Std 1547-2018 — Standard for interconnection and interoperability of distributed energy resources with associated electric power systems interfaces.
- [4] Liu, Z., et al. (2020). Resilient distribution system leveraging distributed generation and microgrids: A review. IET Energy Systems Integration. <https://doi.org/10.1049/iet-esi.2019.0134>
- [5] Brown, T., Hörsch, J., & Schlachtberger, D. (2017). PyPSA: Python for power system analysis. arXiv preprint, arXiv:1707.09913.
- [6] Mishra, S., Pohl, J., Laws, N., Cutler, D., Kwasnik, T., Becker, W., Zolan, A., Anderson, K., Olis, D., & Elgqvist, E. (2020). Computational framework for behind-the-meter DER techno-economic modeling and optimization — REopt Lite. arXiv preprint, arXiv:2008.05873.
- [7] Ackermann T., Andersson G., Söder L. Distributed generation: a definition. Electric Power Systems Research. 2001. Vol. 57. P. 195–204.
- [8] Hatziargyriou N., Asano H., Iravani R., Marnay C. Microgrids. IEEE Power and Energy Magazine. 2007. Vol. 5(4). P. 78–94.
- [9] Smith J., Lopes J.A.P., Hatziargyriou N. Stability issues in distribution networks with distributed generation. IEEE Transactions on Power Systems. 2022. Vol. 37(4). P. 2561–2572.
- [10] Lopes J.A.P., Moreira C., Madureira A. Defining control strategies for microgrids islanded operation. IEEE Transactions on Power Systems. 2021. Vol. 26(2). P. 916–924.
- [11] Ковальчук О.М., Іваненко І.І., Петров П.П. Адаптація міжнародних підходів інтеграції розподіленої генерації до умов України. Вісник енергетики та електротехніки. 2022. №2. С. 40–47.
- [12] Чернюк А.М., Кирисов І.Г., Червик Ю.О. Перспективи інтеграції відновлюваних джерел енергії в електричні мережі України. Енергетика та електрифікація. 2021. №5. С. 24–31.
- [13] DIXI Group. Балансування енергосистеми України: виклики та рішення. Аналітичний звіт. Київ, 2023.
- [14] DIGSILENT PowerFactory Documentation. DIGSILENT GmbH. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.digsilent.de>
- [15] Dakar Eleks. Офіційний сайт програмного комплексу. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://eleks.com>.
- [16] Matlab/Simulink Documentation. MathWorks. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.mathworks.com/products/simulink.html>
- [17] Ansys Electronics Desktop Documentation. Ansys Inc. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-electronics-desktop>

УДК 621.316.1

## АНАЛІЗ ОСОБЛИВИХ РЕЖИМІВ ПРОМИСЛОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ З ІЗОЛЬОВАНОЮ НЕЙТРАЛЛЮ

- ПАПАЙКА Ю.А. д-р. техн. наук, професор, завідувач кафедри електроенергетики НТУ "Дніпровська політехніка", Дніпро, Україна, e-mail: [papaika.yu.a@nmu.one](mailto:papaika.yu.a@nmu.one), ORCID: 0000-0001-6953-1705;
- ЛИСЕНКО О.Г. канд. техн. наук, доцент кафедри електропривода НТУ "Дніпровська політехніка", Дніпро, Україна, e-mail: [lysenko.o.g@nmu.one](mailto:lysenko.o.g@nmu.one), ORCID: 0000-0002-7041-671X;
- МАЛИШКО М.М. аспірант спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка НТУ "Дніпровська політехніка", Дніпро, Україна, e-mail: [malyshko.m.m@nmu.one](mailto:malyshko.m.m@nmu.one), ORCID: 0009-0000-0413-053X;
- УДОВИК О.В. аспірант спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка НТУ "Дніпровська політехніка", Дніпро, Україна, e-mail: [udovyk.o.v@nmu.one](mailto:udovyk.o.v@nmu.one), ORCID: 0009-0002-1000-7815.

**Мета роботи.** Розробка методичних та технічних рішень, спрямованих на підвищення енергоефективності та забезпечення надійності систем електропостачання промислових підприємств.

**Методи дослідження.** Використано системний аналіз режимів роботи систем електропостачання, експериментальні вимірювання із застосуванням апаратно-програмних комплексів та аналіз їх впливу на показники надійності й якості електропостачання.

**Отримані результати.** Запропоновано підхід до формування режимів роботи систем електропостачання, який спрямований на підвищення енергоефективності. Проведено дослідження впливу перехідних процесів на якість електроенергії та обґрунтовано практичні рекомендації щодо оптимізації функціонування енергоємних підприємств.

**Наукова новизна.** Розробка методу контролю параметрів ізоляції електричних мереж під робочою напругою 6-10 кВ.

**Практична цінність.** У роботі розроблено комплексний підхід до підвищення енергоефективності та надійності електропостачання, результати можуть бути використані при модернізації енергосистем промислових підприємств.

**Ключові слова:** система електропостачання; ізольована нейтраль; струм замикання на землю; смісний струм; захист від однофазних замикань на землю; автоматичне повторне вмикання.

### I. ВСТУП

Ефективне функціонування систем електропостачання в умовах обмеженої потужності вимагає гнучких підходів до планування, модернізації та захисту енергетичних мереж[1]. Зокрема, важливими є використання резервних джерел живлення, впровадження інтелектуальних систем управління мережею, підвищення стійкості до кібератак, а також розвиток локальних автономних систем енергоживлення. Надійність електропостачання напряму впливає не лише на стабільність функціонування промисловості, а й на економіку загалом[2].

Феросплавні підприємства є одними з найбільш енергоємних споживачів у промисловості, оскільки технологічні процеси виробництва феросплавів потребують значних обсягів електроенергії при високій стабільності параметрів живлення. Забезпечення енергетичної ефективності та надійності електропостачання таких підприємств є ключовим фактором їх безперервної та економічно доцільної роботи. Особливо актуальним це питання

стає в умовах обмежених можливостей енергосистеми в наслідок бойових дій — через дефіцит потужності, аварійні ситуації, перебої з постачанням, або необхідність дотримання балансу в об'єднаній енергомережі[3].

В сучасних умовах, коли енергосистема України зазнає значного навантаження та структурних змін внаслідок воєнного стану, відновлення інфраструктури та переходу до більш гнучких і децентралізованих рішень, виникає потреба в адаптації енергоспоживачів до нових викликів. Феросплавні заводи мають забезпечити не лише енергоефективність своїх технологічних процесів, а й відповідність режимам роботи енергосистеми, зберігаючи при цьому стабільність і безпеку виробництва.

Однофазні замикання на землю є найпоширенішими пошкодженнями у внутрішніх мережах електропостачання промислових підприємств. Вони створюють небезпеку як для фазної ізоляції обладнання, так і для персоналу. У мережах із ізольованою нейтраллю пошкодження ізоляції щодо землі однієї з фаз призводить до повного перерозподілу напруг фазних проводів у всій системі,

а джерелом змін є місце пошкодження [4].

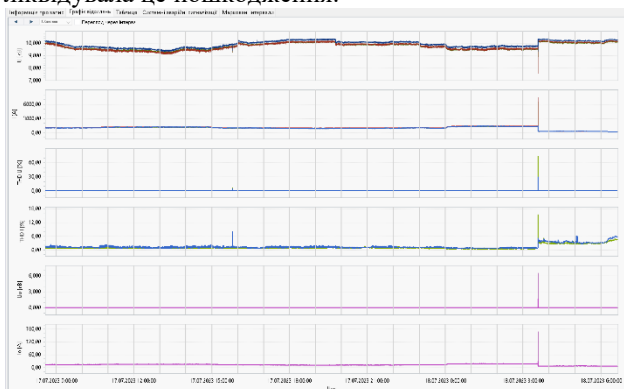
Надійність та стійкість таких мереж значною мірою залежать від вибору схеми живлення, структури мережі, режиму нейтралі та систем захисту. Метою цієї статті є розробка рекомендацій щодо підвищення стійкості мереж внутрішнього електропостачання шляхом оптимального вибору зазначених параметрів.

## II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Під час розробки та обґрунтування варіантів схем електропостачання підприємств, а також вибору структури розподільної мережі, слід враховувати вплив наявності та принцип дії пристроїв захисту від замикань на землю. Враховуючи значну кількість замикань на землю в розподільних мережах, ці пристрої є важливим елементом системи, що визначає її надійність та безпеку[5].

На сьогодні широкі застосування отримали радіальні та змішані схеми електропостачання з одним або двома ступенями розподілу. Виконання мереж, їх структура, кількість понижувальних і розподільних підстанцій визначають величину ємнісного струму замикання на землю, режим роботи нейтралі мережі, а також вибір засобів захисту та їх розміщення.

Результати експериментального безперервного моніторингу параметрів електричних режимів промислових підприємств показали, що однофазні замикання на землю виникають досить часто, особливо під час воєнного стану, коли електричні мережі 6-10 кВ перевантажені. Для прикладу наведемо на рис.1 зареєстрований процес однофазного замикання на землю з ємнісним струмом 168 А. Настільки високі значення струмів замикання є нетиповими для даного класу електричних мереж, засоби захисту та компенсації за подібних режимів можуть працювати з перевантаженням та некоректно[6]. Характеристика параметрів електричних режимів ( $THD$ ,  $I_0$ ,  $U_0$ ) підтверджує замикання з дуговою природою. У даному аварійному процесі система захисту відпрацювала штатно та ліквідувала це пошкодження.



**Рисунок 1.** Реєстрація однофазного замкнення на землю в енергоємних підприємствах у мережі з ізольованою нейтраллю.

На енергоємних підприємствах переважно використовуються змішані розподільчі мережі з напругою 6, 10 кВ. Для таких умов ПУЕ передбачає ізольований режим роботи нейтралі за значеннями ємнісного струму замикання на землю до 30 А у мережі з напругою 6 кВ і до 20 А у мережі з напругою 10 кВ. В іншому випадку нейтраль мережі повинна заземлюватися через дугогасний реактор. Таким чином, електричні мережі можуть працювати в ізольованому або компенсованому режимі нейтралі]. З двох зазначених режимів роботи нейтралі перевагу слід віддати ізольованому режиму з таких причин: компенсовані мережі потребують додаткових капіталовкладень на дугогасні реактори та пристрої для їх підключення і автоматичного налаштування (без пристроїв автоматичного налаштування індуктивності дугогасних пристроїв використання недоцільне)[7]; для компенсованих мереж лише один вітчизняний виробник «КП Промавтоматіка» виробляє засоби захисту від однофазних замикань на землю, придатні для виконання першого ступеня захисту[8]. Слід також зазначити, що застосування ізольованого режиму роботи нейтралі у чистому вигляді також недоцільне. У цьому випадку бажано накладати на аварійний струм активну складову, тобто перевагу слід віддати режиму роботи мережі з резистором у нейтралі.

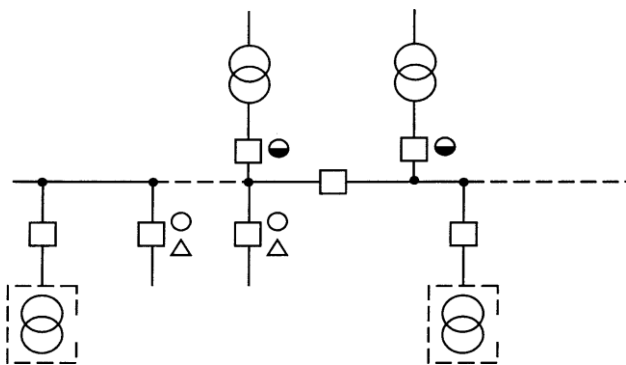
Забезпеченість засобами захисту під час вибору режиму роботи нейтралі має першорядне значення, оскільки експлуатація електричних мереж без захисту від замикань на землю згідно з ПУЕ є неприпустимою[9]. Використання звичайних струмових захистів, що реагують на струм нульової послідовності в компенсованих мережах, ускладнене через неможливість забезпечити їх селективну роботу. У таких мережах залишковий струм замикання на землю є меншим за власний ємнісний струм приєднання, що захищається.

Застосування в компенсованих мережах напрямлених захистів, призначених для мереж з ізольованою нейтраллю, неможливе. Це пояснюється тим, що в таких мережах, порівняно з мережами з ізольованою нейтраллю, змінені фазові співвідношення між векторами струму та напруги нульової послідовності. Крім того, кут між зазначеними величинами не є фіксованим і залежить від режиму налаштування дугогасного реактора[10].

Виходячи з викладеного, а також враховуючи необхідність забезпечення селективної дії пристроїв захисту від однофазних замикань на землю, надамо певні рекомендації щодо вибору структури розподільчих мереж.

## III. МЕТА РОБОТИ

Метою роботи є розробка методичних та технічних рішень, спрямованих на підвищення енергоефективності та забезпечення надійності систем електропостачання промислових підприємств.



○, ●-відповідно перша і друга ступінь захисту від ЗНЗ;  
 Δ- орган АПВ з контролем ізоляції під напругою.

**Рисунок 2.** Одноступенева (класична) схема розподілу електроенергії.

**IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ І АНАЛІЗ ОТРИМАННИХ РЕЗУЛЬТАТІВ**

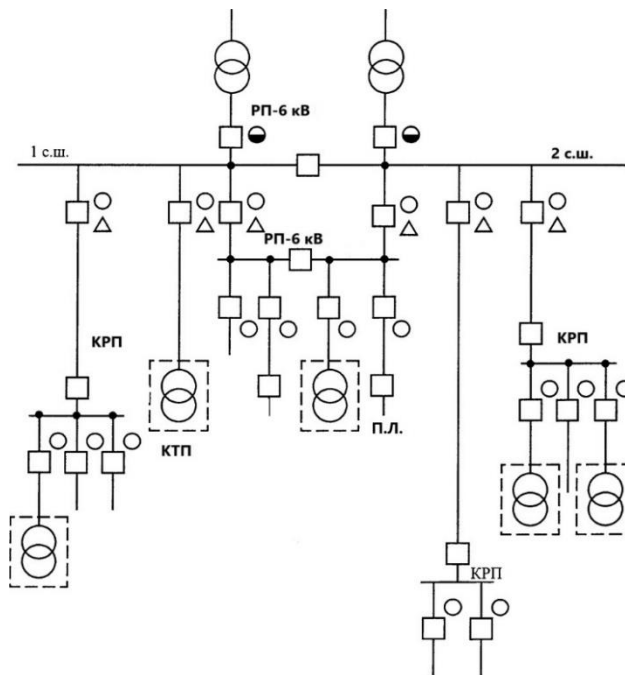
**Розрахунок ємнісного струму та кількості приєднань.**

З метою забезпечення ізольованого режиму роботи нейтралі електричні мережі слід, по можливості, виконувати повітряно-кабельними[11]. Кількість понижувальних підстанцій для підприємства визначається виходячи з максимально допустимого ємнісного струму замикання на землю, який для реальних параметрів розподільної мережі може бути визначений за виразом:

$$I_c = 3U_\phi \omega (\sum C_{Pi} I_{Pi} + \sum C_{Ki} I_{Ki} + \sum C_{Di} N_{Di} + \sum C_{Ti} N_{Ti}) \quad (1)$$

де  $U_\phi$ — фазна напруга мережі, кВ;  $\omega$ — кутова частота мережі;  $C_{Pi}$ ,  $C_{Ki}$  — ємності на фазу відносно землі струмопровідних жил (мкФ/км) відповідно одного кілометра повітряної та кабельної лінії певного перерізу;  $I_{Pi}$ ,  $I_{Ki}$  — сумарні довжини відповідно повітряних та кабельних ліній заданого перерізу, км;  $C_{Di}$ ,  $C_{Ti}$  — ємності на фазу відповідно електродвигунів та силових трансформаторів відносно корпусу обладнання, мкФ;  $N_{Di}$ ,  $N_{Ti}$  — відповідно кількість електродвигунів та трансформаторів заданої потужності, підключених до мережі.

Ємнісний струм однофазного замкнення на землю в мережі 6 кВ Нікопольського заводу феросплавів склав 130А.



**Рисунок 3.** Двоступенева схема розподілу електроенергії.

Власний ємнісний струм ліній визначається за цим самим виразом, але при цьому враховуються лише ємності елементів, підключених до захищеного приєднання[12].

**Рекомендовані схеми та засоби захисту**

Кількість ступенів розподілу електроенергії на напрузі 6 (10) кВ має бути одна або дві (Рисунок 2-3). У другому випадку для виправлення подовжньої неселективності пристроїв захисту ЛЕП від замикань на землю, які виконуються без витримки часу, на верхньому ступені розподілу електроенергії рекомендується встановлювати пристрої автоматичного повторного вмикання (АПВ). Дозволяється додатково встановлювати пристрої АПВ і на нижньому ступені розподілу для виправлення можливої хибної роботи захисту від замикань на землю, а також у одноступеневих мережах.

Для одноступеневої схеми розподілу електроенергії (Рисунок 2) при використанні для захисту від замикань на землю струмових (ненаправлених) пристроїв кількість відгалужених приєднань за умови приблизної рівності їх фізичних параметрів визначається за виразом[13]:

$$n \geq \frac{I_{c3}}{I_{oc}} \geq k_q k_k = 1,5(4 \dots 5) \geq 6 \dots 7 \quad (2)$$

де  $I_{c3}$  — струм спрацювання захисту;  $I_{oc}$ — власний ємнісний струм захищеного приєднання;  $k_q = 1,5$  — коефіцієнт чутливості;  $k_k = (4 \dots 5)$  — коефіцієнт, що враховує кидки ємнісного струму в момент замикання.

За значних відмінностей власних ємнісних струмів ліній кількість приєднань визначається таким чином

$$n \geq I_{oc.max} k_q k_k / I_{oc.min} \quad (3)$$

де  $I_{oc.max}$ — максимальний власний ємнісний струм із усіх приєднань, підключених до секції шин;  $I_{oc.min}$ — власний ємнісний струм приєднання з найменшою ємністю щодо землі тієї ж секції шин.

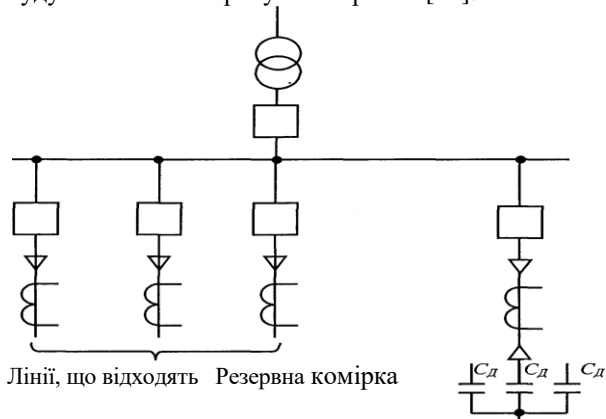
#### Обґрунтування резистивних способів заземлення нейтралі.

У разі заземлення нейтралі мережі через високоомний резистор (режим накладення активної складової струму замикання на землю), його значення визначається за виразом:

$$R_H = \left(\frac{1}{3} \dots \frac{2}{3}\right) X_C \quad (4)$$

Мінімальна кількість відгалужених приєднань зменшується до 3-5 за рахунок зменшення коефіцієнта  $k_k$ , який у таких умовах знаходиться в межах 2–3 ( $X_C$  - ємнісний опір однієї фази мережі щодо землі).

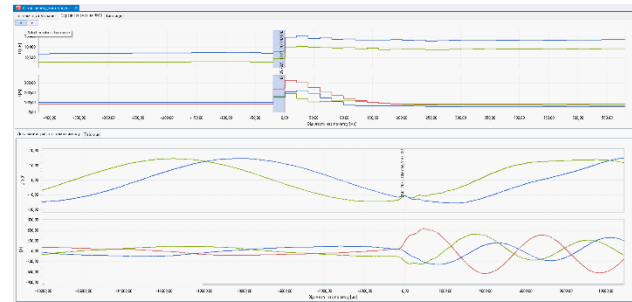
При використанні зх пристроїв захисту від замикань на землю кількість відгалужених приєднань від підстанції для системи електропостачання повинна становити не менше трьох, за умови, що два з них будуть постійно перебувати в роботі[14].



**Рисунок 4.** Приєднання додаткової ємності для забезпечення працездатності пристроїв захисту від замикань на землю в нерозгалужених мережах.

У разі необхідності використання нерозгалужених мереж (трансформатор і один розподільний пункт, для живлення трансформатору 6/10 кВ), якщо кількість приєднань три або менше, до шин слід приєднати конденсаторну установку, включену в зірку із заземленою нульовою точкою, з ємністю не більше 0,2 мкФ на фазу (Рисунок 4).

В особливих умовах (пусковий перехідний процес на конденсаторах) виникає імпульсний струм заряду конденсатора, який залежить від початкової напруги на конденсаторах, напруги мережі в момент вмикання, імпедансу ланцюга  $LR$ , який може тривати до 10 періодів[15,16]. Кратність коливання струму зазвичай в два рази перевищує коливання напруги (Рисунок 5). Слід враховувати ці коливання при розрахуванні карти уставок направленої захисту.



**Рисунок 5.** Перехідний процес включення конденсаторної батареї

Приєднання ємності забезпечить надійність і селективність роботи захистів, а відповідно, і надійність та стійкість електропостачання споживачів у цілому, за рахунок зменшення тривалості необґрунтованих простоїв.

#### Розробка методу контролю параметрів ізоляції електричних мереж під робочою напругою 6-10 кВ.

Надійність і безпека роботи систем електропостачання значною мірою залежать від значень активних і реактивних опорів ізоляції електричної мережі відносно землі. Безперервний та автоматичний контроль значень складових ізоляції електричної мережі (активних і ємнісних опорів ізоляції фаз мережі відносно землі) дозволить прогнозувати виникнення небезпечних станів системи[17]. За допомогою програмно-апаратного комплексу SCADA вводяться випереджаючі керуючі команди, які дозволяють мінімізувати можливі втрати.

Для підвищення надійності систем електропостачання, зниження ймовірності аварій через неаварійне поступове зниження рівня активного опору ізоляції, підвищення рівня електробезпеки мереж необхідна система безперервного контролю ізоляції.

Існуючі на даний час пристрої мають складні непрямі налаштування та розраховані на контроль ємнісного опору ізоляції мережі, але не здатні вибірково контролювати параметри ізоляції окремих приєднань[18].

Запропонований метод безперервного вимірювання значень складових опорів ізоляції мережі відносно землі під робочою напругою заснований на використанні накладених на мережу оперативних струмів непромислової частоти. Даний метод на основі SCADA може бути використаний для:

- оперативної оцінки рівня активного опору ізоляції мережі в цілому, та кожного з приєднань розподільчої мережі;
- оперативної оцінки рівня ємнісного опору ізоляції мережі в цілому, та кожного з приєднань розподільчої мережі;
- організація вибіркової сигналізації або захисту від замикань на землю в системах електропостачання незалежно від

конфігурації та режиму роботи нейтралі мережі;

Суть запропонованого методу безперервного та оперативного контролю параметрів ізоляції відносно землі електричної мережі та її елементів полягає у накладанні двох оперативних сигналів, частоти яких не рівні між собою і відрізняються від промислової. На контрольованих ділянках (лінії або приєднанні), а також у місці приєднання оперативного джерела встановлюються пристрої, призначені для зняття та обробки відповідних сигналів. Після виконання обчислень заздалегідь запрограмованих у SCADA, видаються сигнали, що відповідають значенням параметрів ізоляції на контрольованих ділянках системи електропостачання.

Значення оперативного струму в підконтрольній мережі

$$I = \frac{U}{Z} \quad (5)$$

де  $I$  – струм накладеного сигналу,  $U$  – напруга оперативного джерела,  $Z = R + j\frac{1}{\omega c}$  - повний опір ізоляції мережі для оперативної частоти  $\omega$ .

Після виконання перетворення, отримаємо:

$$I = \frac{U}{R + j\frac{1}{\omega c}} \quad (6)$$

Якщо на мережу накладено два високочастотних струма, тоді до кожного сигналу:

$$I_1 = \frac{U_1}{R + j\frac{1}{\omega_1 c}}, I_2 = \frac{U_2}{R + j\frac{1}{\omega_2 c}} \quad (7)$$

Припустимо, що ємність контрольованої ділянки не змінюється протягом вимірювання, тобто  $C = const$ . Прирівнявши вирази за ємністю та вирішивши їх відносно активного опору ізоляції, отримаємо:

$$R = \frac{\omega_2 U_2 I_1 - \omega_1 U_1 I_2}{I_1 I_2 (\omega_2 - \omega_1)} \quad (8)$$

Аналогічним чином, припустивши, що значення активного опору ізоляції контрольованої ділянки не змінюється ( $R = const$ ), отримаємо вираз для відповідної ємності:

$$C = \frac{I_1 I_2 (\omega_2 - \omega_1)}{\omega_2 \omega_1 (U_1 I_2 - U_2 I_1)} \quad (9)$$

Оптимальною конфігурацією схеми будь-якої системи SCADA є схема з модульним принципом компонування, оскільки така модель передбачає можливість подальшого розширення і модернізації системи при найменших конструктивних змінах. SCADA, що реалізує метод безперервного контролю під робочою напругою значень складових ізоляції в

розподільних мережах напругою 6 - 10 кВ, складається з функціональних блоків:

- блок накладення на мережу оперативних струмів непромислової частоти;
- блок зняття та перетворення оперативних сигналів;
- блок з'єднання та зовнішніх комутацій;
- контролер нижнього рівня системи SCADA;
- контролер верхнього рівня системи SCADA.

Блок накладення на мережу оперативних струмів непромислової частоти може бути реалізований за допомогою спеціальних трансформаторів, приєднаних до нейтралі мережі. До вторинних обмоток цих трансформаторів приєднують генератори з заданими оперативними частотами.

Блок зняття та перетворення оперативних сигналів у найпростішому варіанті реалізується за допомогою вимірювальних трансформаторів струму.

Блок з'єднання та зовнішніх комутацій складається з:

1. Пристрою з'єднання з лінією електропередачі та перетворення сигналу на низьку напругу.
2. Фільтра виділення сигналу оперативної частоти.
3. Цифро-аналогового перетворювача типу ПАВ-3.

Елемент перетворення сигналу складається з двох кіл, які відрізняються частотою виділеного сигналу.

Контролер UCD SCADA реалізує функції:

1. Збору, первинної обробки, зберігання інформації про стан контрольованих параметрів.
2. Програмно-апаратного та логічного управління.
3. Регулювання технологічних параметрів.
4. Відображення інформації.
5. З'єднання з UMD SCADA вищого рівня, включаючи роботу в мережах.

Блок управління та сигналізації на базі UMD виконує функції: візуального та звукового оповіщення, видачі керуючих сигналів на нижчий рівень UCD. Контролер передає сигнал на виконуючі пристрої.

Безвідмовність роботи сучасного обладнання в значній мірі визначається надійністю ізоляції, яка піддається постійному впливу численних факторів. До них належать: механічні пошкодження, електромагнітні поля, хімічно активні речовини, кліматичні фактори тощо.

Зміни, що відбуваються під впливом перелічених факторів, призводять до погіршення параметрів ізоляції. Це веде до виникнення аварій з важкими наслідками.

Запропонована система безперервного контролю ізоляції та захисту від витоків у розподільчих мережах металургійних підприємств напругою 6, 10кВ функціонує за принципом порівняння сигналів. Після виконання обчислень за заздалегідь заданим алгоритмом, видається сигнал



(блінкер), якщо параметри контрольованої ділянки виходять за межі допустимого. Параметри нормальної роботи ділянки задаються заздалегідь.

Схема функціонує наступним чином: сигнал від пристрою виділення напруги нульової послідовності надходить на пристрій виділення сигналів накладеної частоти. Пристрій виділення сигналів накладеної частоти складається з загороджувального фільтра для промислової частоти та фільтрів для виділення робочих частот. Виділені сигнали надходять на аналогово-цифровий перетворювач (АЦП). У АЦП відбувається перетворення аналогових сигналів у цифрові та передача їх на UCD для подальшої обробки. Перевага методу - невисокі вимоги до SCADA, оскільки не потрібні великі обчислення.

Недоліки методу:

- висока вартість (фільтри, два аналого-цифрових перетворювачі);
- неможливість чистого виділення робочих сигналів на частотах, близьких до промислової, що призводить до великої похибки;
- тимчасова похибка виділених значень сигналів при перетворенні двома аналого-цифровими перетворювачами.

Другий можливий метод реалізації системи моніторингу дозволяє відмовитися від використання фільтрів. Аналоговий сигнал з трансформатора нульової послідовності при цьому надходить на АЦП, де перетворюється у цифровий. Цифровий сигнал потрапляє в UCD, де програмним способом здійснюється виділення сигналів робочих частот. Потім на основі значень цих сигналів проводяться подальші обчислення.

Переваги системи:

- можливість роботи з частотами, близькими до промислової;
- зменшення похибки при виділенні робочих частот;
- відсутність тимчасової похибки.

Недоліком є збільшення навантаження на контролер UCD, оскільки він повинен виділяти частоти і лише потім приступати до основних обчислень. При аналізі витрат на побудову систем за першим та другим методом було виявлено, що витрати на виготовлення та експлуатацію у другому випадку менші. Оскільки частоти опорних сигналів близькі до промислової частоти, перевага надається другому методу.

## V. ВИСНОВКИ

Інформація, наведена у статті, щодо проведеного дослідження стосується актуальної науково-технічної проблеми забезпечення надійності та безпеки експлуатації високовольтних електродвигунів у промислових умовах, зокрема на підприємствах феросплавної галузі. Враховуючи значні масштаби енергоспоживання та безперервний характер виробничих процесів, виникає необхідність у впровадженні сучасних методів діагностики, які здатні в реальному часі відстежувати параметри роботи

обладнання, своєчасно виявляти дефекти та прогнозувати можливі аварійні ситуації.

У роботі проведено аналіз існуючих підходів до контролю технічного стану електричних машин, зокрема методів діагностики ізоляції, контролю струмів і напруг. Встановлено, що традиційні методи діагностики часто мають низьку оперативність, потребують значних трудових ресурсів і не завжди дозволяють своєчасно попередити відмови. Саме тому обґрунтовано доцільність використання інтелектуальних систем моніторингу на базі SCADA, які забезпечують автоматизоване збирання, обробку та зберігання великих масивів даних.

Запропонований у статті метод ґрунтується на поєднанні математичних моделей електромеханічних процесів у високовольтному обладнанні з алгоритмами аналізу, реалізованими в SCADA-системі. Такий підхід дозволяє не лише контролювати поточний стан ізоляції та навантаження, а й здійснювати прогнози деградації, визначати тенденції зміни параметрів та формувати рекомендації для обслуговуючого персоналу. Важливим є те, що система функціонує у режимі реального часу, що значно знижує ймовірність раптових аварій і сприяє підвищенню загальної надійності електроприводних установок.

Практичне значення отриманих результатів виражається в можливості інтеграції SCADA-методу в існуючі системи управління енергетичним обладнанням без суттєвих додаткових витрат, що робить його привабливим для промислових підприємств різних галузей.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з удосконаленням алгоритмів діагностики шляхом використання методів машинного навчання та штучного інтелекту, що дозволить підвищити точність прогнозування та адаптивність системи до зміни умов експлуатації. Крім того, доцільним є розширення функціональних можливостей SCADA-систем шляхом інтеграції з цифровими двійниками електромеханічних комплексів та створення єдиних платформ для управління енергетичними об'єктами в умовах індустрії.

Подальший розвиток у цьому напрямку сприятиме підвищенню енергоефективності, зниженню експлуатаційних витрат і забезпеченню стабільної роботи енергетичної інфраструктури підприємств.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Pivniak, H., Aziukovskyi, O., Papaika, Yu., Lutsenko, I., Neuberger, N. Problems of development of innovative power supply systems of Ukraine in the context of European integration. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2022, no. 5, pp. 89–103. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-5/089>.
- [2] Papaika, Yu., Lysenko, O., Koshelenko, Ye., Olishevskyi, I. Mathematical modeling of power

- supply reliability at low voltage quality. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2021, no. 2, pp. 97–103. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-2/097>.
- [3] Pivnyak, G., Azukovskiy, O., Papaika, Yu., Cabana, E. C., Olczak, P., Dyczko, A. Assessment of power supply energy efficiency by voltage quality criterion. *Rynek Energii*, 2021, no. 4(155), pp. 75–84. ISSN 1425-5960.
- [4] Nikander, A., Järventausta, P. Identification of high-impedance earth faults in neutral isolated or compensated MV networks. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2017, vol. 32, pp. 1187–1195. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7809183>.
- [5] Lahutin, V. M., Zelinskyi, V. Ts., Burykin, O. B. Testing of electrical machines and transformers in power systems. Vinnytsia: VNTU, 2010. 115 p.
- [6] Papaika, Yu., Lysenko, O., Rogoza, M., Stepanenko, Yu., Tokar, L., Yakimets, S. Energy losses within the electric equipment in terms of poor voltage quality. *Bulletin of Mykhailo Ostrohradskyi Kremenchuk National University*, 2019, no. 1(114), pp. 9–13. DOI: <https://doi.org/10.30929/1995-0519.2019.1.9-13>.
- [7] Vovk, Yu. M., Sydorenko, V. V. Neutral operating modes in networks up to 35 kV. Lviv: LNTU, 2019.
- [8] Promavtomatyka. Technical documentation. Kyiv. URL: <https://promautomatika.kiev.ua> (дата звернення: 30.08.2025).
- [9] Rules for Electrical Installations (PUE). Kyiv: Ministry of Fuel and Energy of Ukraine, 2006.
- [10] Bieliaiev, B. M. Compensation of ground fault currents. Kyiv: Tekhnika, 2007.
- [11] Stepanenko, Y. V. Study of unbalance voltage in three-phase networks with different neutral modes. *Electrical Engineering & Power Engineering*, 2024, no. 2, pp. 27–35. DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2024-2-3>.
- [12] Khrapach, S. P. Fundamentals of relay protection. Dnipro: NMetAU, 2020.
- [13] DSTU 31348:2005. Calculation of short-circuit currents.
- [14] Lowczowski, K., Lorenc, J., Andruszkiewicz, J., Nadolny, Z., Zawodniak, J. Novel earth fault protection algorithm based on MV cable screen zero sequence current filter. *Energies*, 2019, vol. 12, no. 16, p. 3190. DOI: <https://doi.org/10.3390/en12163190>.
- [15] Pivnyak, G. G., Zhezhelenko, I. V., Papaika, Yu. A. Transients in Electric Power Supply Systems. Switzerland : Trans Tech Publications LTD, 2016. URL: <http://trove.nla.gov.au/version/232262440> (дата звернення: 30.08.2025).
- [16] Balasmekh, F. K. Transient processes in ground faults. In: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference "Modern Technologies for Economic and Safe Use of Electric Power", Dnipropetrovsk, 1997, pp. 163–168.
- [17] Fedosieiev, S. V. Protection against earth faults. Kharkiv: Energoatom, 2012.
- [18] Abbas, A. K., Hamad, S., Hamad, N. A. Single line to ground fault detection and location in medium voltage distribution system network based on neural network. *International Journal of Electrical and Computer Engineering Systems*, 2021, vol. 23, no. 2, pp. 621–632. DOI: <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v23.i2.pp621-632>.

Надійшла (Received) 12.08.2025;

Прийнята (Accepted) 18.09.2025;

Опублікована (Published) 22.10.2025;

## ANALYSIS OF SPECIAL OPERATING MODES OF INDUSTRIAL ELECTRICAL NETWORKS WITH AN ISOLATED NEUTRAL

- PAPAİKA YU.A. Sci.D, Professor, head of department of Electrical Power Engineering, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine, e-mail: [papaika.yu.a@nmu.one](mailto:papaika.yu.a@nmu.one), ORCID: 0000-0001-6953-1705;
- LYSENKO O.G. Ph.D, Associate professor, Department of Electrical Power Engineering, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine, e-mail: [lysenko.o.g@nmu.one](mailto:lysenko.o.g@nmu.one), ORCID: 0000-0002-7041-671X;
- MALYSHKO M.M. Postgraduate student of specialty 141 Electric power engineering, electrical engineering and electromechanics, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine, e-mail: [malyshko.m.m@nmu.one](mailto:malyshko.m.m@nmu.one), ORCID: 0009-0000-0413-053X;
- UDOVYK O.V. Postgraduate student of specialty 141 Electric power engineering, electrical engineering and electromechanics, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine, e-mail: [udovyk.o.v@nmu.one](mailto:udovyk.o.v@nmu.one), ORCID: 0009-0002-1000-7815.

**Purpose.** Development of methodological and technical solutions aimed at improving energy efficiency and ensuring the reliability of power supply systems of industrial enterprises.

**Methodology.** System analysis of operating modes of power supply systems, experimental measurements using hardware–software complexes, and assessment of their impact on reliability and power quality indicators.

**Results obtained.** An approach to the formation of operating modes of power supply systems that contributes to improving energy efficiency has been proposed. The influence of transient processes on power quality has been investigated, and practical recommendations for optimizing the operation of energy-intensive enterprises have been substantiated.

**Scientific Novelty.** An innovative methodology for monitoring the insulation parameters of electrical networks operating at 6–10 kV has been developed, enabling diagnostics under real operating conditions.

**Practical Value.** The study proposes a comprehensive framework aimed at enhancing the energy efficiency and reliability of power supply systems. The obtained results are applicable to the modernization and optimization of industrial power networks.

**Keywords:** power supply system, isolated neutral, ground fault current, capacitive current, single-phase-to-ground fault protection, automatic reclosing.

## REFERENCES

- [1] Pivniak, H., Aziukovskiy, O., Papaika, Y., Lutsenko, I., & Neuberger, N. (2022). Problems of development of innovative power supply systems of Ukraine in the context of European integration. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (5), 89–103. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-5/089>
- [2] Papaika, Y., Lysenko, O., Koshelenko, Y., & Olishevskiy, I. (2021). Mathematical modeling of power supply reliability at low voltage quality. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (2), 97–103. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-2/097>
- [3] Pivnyak, G., Azukovskiy, O., Papaika, Y., Cabana, E. C., Olczak, P., & Dyczko, A. (2021). Assessment of power supply energy efficiency by voltage quality criterion. *Rynek Energii*, 4(155), 75–84.
- [4] Nikander, A., & Järventausta, P. (2017). Identification of high-impedance earth faults in neutral isolated or compensated MV networks. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 32, 1187–1195. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7809183>
- [5] Lahutin, V. M., Zelinskyi, V. T., & Burykin, O. B. (2010). *Testing of electrical machines and transformers in power systems*. Vinnytsia: VNTU.
- [6] Papaika, Y., Lysenko, O., Rogoza, M., Stepanenko, Y., Tokar, L., & Yakimets, S. (2019). Energy losses within the electric equipment in terms of poor voltage quality. *Bulletin of Mykhailo Ostrohradskiyi Kremenchuk National University*, 1(114), 9–13. <https://doi.org/10.30929/1995-0519.2019.1.9-13>
- [7] Vovk, Y. M., & Sydorenko, V. V. (2019). *Neutral operating modes in networks up to 35 kV*. Lviv: LNTU.
- [8] Promavtomatyka. (n.d.). *Technical documentation*. Kyiv. <https://promautomatika.kiev.ua>
- [9] *Rules for Electrical Installations (PUE)*. (2006). Kyiv: Ministry of Fuel and Energy of Ukraine.
- [10] Bieliaiev, B. M. (2007). *Compensation of ground fault currents*. Kyiv: Tekhnika.
- [11] Stepanenko, Y. V. (2024). Study of unbalance voltage in three-phase networks with different neutral modes. *Electrical Engineering & Power Engineering*, (2), 27–35. <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2024-2-3>
- [12] Khrapach, S. P. (2020). *Fundamentals of relay protection*. Dnipro: NMetAU.
- [13] DSTU 31348:2005. (2005). *Calculation of short-circuit currents*.
- [14] Lowczowski, K., Lorenc, J., Andruszkiewicz, J., Nadolny, Z., & Zawodniak, J. (2019). Novel earth fault protection algorithm based on MV cable screen zero sequence current filter. *Energies*, 12(16), 3190. <https://doi.org/10.3390/en12163190>
- [15] Pivnyak, G. G., Zhezhelenko, I. V., & Papaika, Y. A. (2016). *Transients in electric power supply systems*. Switzerland: Trans Tech Publications LTD. <http://trove.nla.gov.au/version/232262440>
- [16] Balasmekh, F. K. (1997). Transient processes in ground faults. In *Proceedings of the International Scientific and Technical Conference "Modern Technologies for Economic and Safe Use of Electric Power"* (pp. 163–168). Dnipropetrovsk.
- [17] Fedosieiev, S. V. (2012). *Protection against earth faults*. Kharkiv: Energoatom.
- [18] Abbas, A. K., Hamad, S., & Hamad, N. A. (2021). Single line to ground fault detection and location in medium voltage distribution system network based on neural network. *International Journal of Electrical and Computer Engineering Systems*, 23(2), 621–632. <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v23.i2.pp621-632>

УДК 621.316.13

## МОЖЛИВОСТІ ІМПЛЕМЕНТАЦІЇ В РЕЛЕЙНОМУ ЗАХИСТІ АЛГОРИТМУ ПОШУКУ ПЕРЕД АВАРІЙНИХ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ УМОВ ШЛЯХОМ ВИКОРИСТАННЯ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ З ПІДКРІПЛЮВАНИМ НАВЧАННЯМ

ЦЮПА В.М.

аспірант кафедри передачі електричної енергії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4269-1941>; e-mail: [vladyслав.tsiupa@iee.khpi.edu.ua](mailto:vladyслав.tsiupa@iee.khpi.edu.ua) ;

ДАНИЛЬЧЕНКО Д.О.

професор кафедри передачі електричної енергії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7912-1849>; e-mail: [dmytro.danylchenko@khpi.edu.ua](mailto:dmytro.danylchenko@khpi.edu.ua) ;

**Мета роботи.** Метою статті є розробка та апробація нового методу пошуку граничних та перед аварійних режимів в енергосистемах для задачі розрахунку уставок релейного захисту. Запропонований підхід базується на інтеграції графових нейронних мереж із глибинним навчанням з підкріпленням (ГНП) та спрямований на суттєве скорочення часу обчислень при збереженні високої точності та забезпеченні селективності захисту.

**Методи дослідження.** У роботі використано методологію марковських процесів прийняття рішень для формалізації задачі пошуку граничних та передаварійних режимів. Для вилучення структурної інформації з енергосистеми застосовано графові нейронні мережі, а оптимальні стратегії дій агента сформовано за допомогою глибинного навчання з підкріпленням. Додатково розроблено дворівневу навчальну схему **GLFE** (керуване навчання та вільне дослідження), яка забезпечує стабільну збіжність алгоритму та прискорює навчання. Експерименти проведено на тестовій системі ІБЕЕ 39-шин з використанням сценарного моделювання.

**Отримані результати.** Показано, що застосування графової нейронної мережі з ГНП дозволяє скоротити обчислювальні витрати у 10–1000 разів порівняно з традиційними методами перебору. Точність прогнозування досягає понад 90%, а е-точність перевищує 98%. Запропонований метод демонструє високу ефективність як у задачах визначення максимальних струмів короткого замикання для миттєвого струмового захисту, так і у масштабованих сценаріях на великих системах.

**Наукова новизна.** Уперше запропоновано інтеграцію графових нейронних мереж для вирішення задачі пошуку граничних та передаварійних режимів у релейному захисті. Розроблено унікальну дворівневу навчальну схему **GLFE**, яка поєднує елементи контрольованого та неконтрольованого навчання. Це дозволило досягти високої точності при значному зменшенні кількості навчальних прикладів.

**Практична цінність.** Результати дослідження можуть бути використані при розробці інтелектуальних систем релейного захисту та автоматизації електроенергетичних мереж. Запропонований метод здатний адаптуватися до умов швидкозмінних режимів роботи енергосистем із високою часткою відновлюваних джерел. Крім того, архітектура може бути легко адаптована для розв'язання інших задач оптимізації та управління у складних енергетичних середовищах.

**Ключові слова:** граничні та передаварійні режими, релейний захист, графові нейронні мережі, глибинне навчання з підкріпленням, енергосистеми, електроенергетика.

### I. ВСТУП

Захист обладнання на всіх ланках від виробництва та передачі до споживання є критично важливим пунктом для забезпечення стабільної та безпечної експлуатації енергетичної системи. Саме тому релейному захисту приділяється стільки значення, бо у випадку, коли ділянка із наявною аварією чи помилкою не буде ізольована, обладнання в найпростішому випадку буде пошкоджено, а в найскладнішому це призведе до каскадних обвалів і неконтрольованих процесів в енергетичній системі. Саме заради забезпечення надійного та своєчасного відключення пошкодженого

обладнання існують і постійно вдосконалюються технології релейного захисту.

В електромеханічному виконанні системи релейного захисту часто мали сталі налаштування, що попередньо розраховувались. В сучасних релейних терміналах, за рахунок цифровізації алгоритмів захисту з'являється можливість адаптувати режими роботи під умови експлуатації, що постійно змінюються.

Для того, щоб релейний захист в усіх умовах відповідав нормованим вимогам та запобігав проблем з неправильним спрацюванням (наприклад передчасним або неселективним) слід урахувати при роз-

© Цюпа В.М., Данильченко Д.О., 2025

Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License (CC-BY-SA 4.0)

<https://doi.org/10.15588/1607-6761-2025-3-6>

рахунках налаштувань режими близькі до граничних (екстремальні) а також передаварійні. На даному етапі розвитку релейних систем ця проблема є одною з найважливіших, оскільки вищеописані умови є складними для регулювання, однак важливими через вплив цих режимів на стан обладнання.

Їх пошук складається з дискретного простору, в якому існує оптимальне рішення, а значить дана проблема відноситься до комбінаторної оптимізації. Вирішення даної задачі можливо багатьма способами але всі вони є часозатратними через розмірність простору пошуку. Серед розповсюджених методів: послідовний перебор, евристичні алгоритми та математичне програмування.

Оскільки в якості вузлів для даної задачі виступають підстанції, а в якості ребр – лінії, то невпинне збільшення масштабу енергосистеми призводить до масштабування кількості можливих режимів експлуатації для прорахунку.

Неконтрольованість та складність в прогнозуванні альтернативних джерел енергії також значно впливає на режими експлуатації електричної мережі.

Таким чином, сума вищевказаних факторів значно збільшує швидкість розрахунків в існуючих методах, що не дає змогу навіть наблизитися до створення On-time системи. Для швидкої обробки даних задача потребує більш ефективних методів.

Перспективним рішенням може стати використання рішення глибокого навчання з підкріпленням (ГНП або DRL). В практиці воно активно використовується в різних застосунках для енергетичних систем, наприклад, для аварійного керування, оптимізації розподілу потужності, тощо.

Ключовою відмінністю від стандартних методик є те, що при використанні ГНП зменшується кількість затримок. ГНП можна попередньо навчити в офлайн-фазі, після чого пул оптимальних рішень буде передаватися для використання в онлайн-фазі, скорочуючи час реакції.

## II. МЕТА РОБОТИ

Метою роботи є розробка та апробація нового методу пошуку граничних та перед аварійних режимів в енергосистемах для задачі розрахунку уставок релейного захисту. Запропонований підхід базується на інтеграції графових нейронних мереж із глибинним навчанням з підкріпленням (ГНП) та спрямований на суттєве скорочення часу обчислень при збереженні високої точності та забезпеченні селективності захисту.

## III. ПРОПОНОВАНА СТРУКТУРА НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ З ГНП

Алгоритм нейронної мережі з ГНП, що належить до зрілих методів у класі reinforced learning (RL) на основі функцій цінності, добре підходить для розв'язання задач із дискретними просторами станів

та дій [1]. При цьому енергосистеми природно описуються у вигляді графових структур, де вузли та гілки мають довільну індексацію й не впорядковані за своєю природою. Через це моделі, здатні навчатися лише у традиційному евклідовому просторі, менш придатні для таких задач. Натомість графові нейронні мережі (GNN) однаково обробляють усі вузли та ребра і безпосередньо працюють у топологічному просторі, що дає змогу отримувати знання про структуру мережі. Тому у цій роботі пропонується інтегрувати GNN і нейронної мережі з ГНП у єдину схему — графової нейронної мережі з ГНП. У ній GNN виконує вилучення ознак енергосистеми, а агент DRL використовує отриману інформацію для вибору граничних та передаварійних режимів. Далі розглянуто побудову такої архітектури для задачі EOCS у розрахунках уставок релейного захисту.

**Математична постановка задачі граничних та передаварійних режимів.** У цій роботі застосовано перший підхід до розрахунку уставок, тобто спочатку визначаються підготовчі величини, а вже потім виконуються власне розрахунки. У практиці енергосистем використовують різні типи захистів: максимальний струмовий [2-5], дистанційний [6,7], нульової послідовності [8-10] тощо. Серед них струмова відсічка є простим, надійним і широко поширеним способом локалізації коротких замикань на лініях електропередачі.

Розглянемо приклад системи, приведеної на рис.1. При виникненні короткого замикання в зеленій зоні рисунку 1, струм  $I_k$ , що проходить по лінії, визначається виразом

$$I_k = \frac{E_s}{X_s + X_k} = \frac{E_s}{X_s + X_{ul}}$$

де  $E_s$  та  $X_s$  — це відповідно ЕРС і реактивний опір джерела живлення, а  $X_{ul}$  — реактивний опір одиницю довжини лінії.

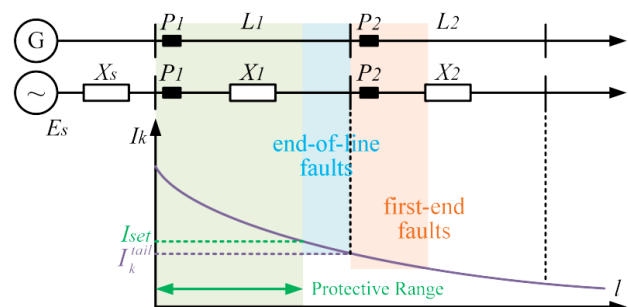


Рисунок 1. Принцип налаштування струмового захисту

Для забезпечення селективності захисту відключення реле P1 має відбуватися лише тоді, коли коротке замикання виникає безпосередньо на лінії L1 [11-

13]. Однак через похибки трансформаторів струму можливе змішування подій у кінці захищеної лінії з подіями на початку суміжної. Щоб уникнути помилкових спрацювань, струм спрацювання задається трохи вищим за максимальний струм КЗ у хвостовій точці лінії. Тоді уставка струму  $I_{set}$  та критерій дії визначаються як:

$$I_{set} = K \cdot I_k^{tail.max}, I > I_{set}$$

де  $I_k^{tail.max}$  - максимальний струм КЗ у кінці захищеної ділянки, а коефіцієнт  $K > 1$  зазвичай береться у межах 1.2–1.3.

У результаті зона дії захисту R охоплює відрізок лінії, позначений зеленим на рис. 1. Таким чином, задача пошуку екстремальних умов у цьому випадку зводиться до виявлення таких режимів роботи іншого обладнання, за яких струм у хвостовій точці досягає глобального максимуму. Відповідно, саме величин  $I_k^{tail.max}$  виступає необхідною підготовчою змінною для налаштування миттєвого струмового захисту. Для спрощення аналізу далі розглядаються лише комбінації вмикання та вимикання інших ліній у системі.

Практичний досвід показує, що чим далі від точки пошкодження відбувається зміна стану обладнання, тим менший її вплив на величину аварійного струму. Це так званий принцип оберненої залежності відстані. Саме він лежить в основі традиційних методів визначення граничних та передаварійних режимів при розрахунку уставок реле. Найбільш характерним прикладом є локальне дослідження шляхом прямого перебору варіантів [14-16]: спочатку задається зона пошуку R довкола місця пошкодження на радіус r, у

якій враховується не більше ніж k відключених елементів із можливих N. Далі методом повного перебору [17] аналізуються всі комбінації станів обладнання у цій зоні, щоб знайти такі режими, що формують максимальний струм КЗ i, відповідно, екстремальні умови експлуатації. Недоліком цього підходу є те, що вибір області R робиться здебільшого емпірично: занадто вузька зона не гарантує виявлення глобальних граничних режимів, а надто широка — значно збільшує витрати часу на розрахунок [18-20].

Щоб подолати описаний вище недолік, пропонується швидкий метод визначення граничних та передаварійних режимів для розрахунку уставок миттєвого струмового захисту, заснований на підході графової нейронної мережі з ГНП. У практичних умовах трифазні короткі замикання зазвичай спричиняють найсерйозніші наслідки, причому величина струму КЗ обернено пропорційна опорю заземлення. Тому запропонований підхід спрямований на пошук такого граничного чи передаварійного стану, за якого струм короткого замикання набуває максимального значення у випадку трифазного КЗ із нульовим опором заземлення в кінцевій точці лінії. На цій основі може бути сформульована математична модель задачі визначення граничних та передаварійних режимів для миттєвого струмового захисту як:

$$I_k^{tail.max} = \max_{\tau \in T} I_{k,t,z,f}^{tail.max} = \max_{\tau \in T} SCC(x_1, \dots, x_m, z, f)$$

$$\tau = \{x_1, \dots, x_m\}$$

$$s, t \{x_i \in \{0, 1\}, i \in \{1, 2, \dots, m\}\}$$

$$z = 0, f = f^{(3)}$$

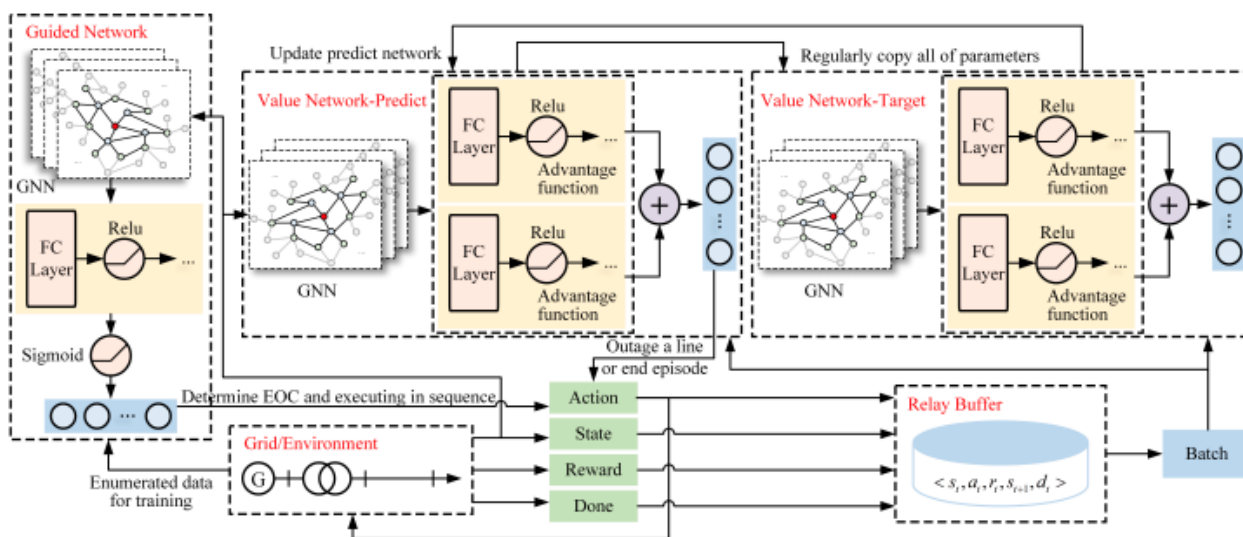


Рисунок 2. Загальна архітектура графової нейромережі з ГНП.

**Архітектура графової нейронної мережі з ГНП.** Застосування методів глибинного навчання з підкріпленням потребує представлення задачі у вигляді мар-

ковського процесу прийняття рішень. Тому задачу пошуку граничних та передаварійних режимів слід розбити на покроковий процес виконання. На почат-

ковому етапі випадковим чином задається робочий стан системи — тобто комбінація увімкнених і вимкнених ліній, що приймається як початковий стан середовища. Агент обирає дію — відключити певну лінію залежно від місця розташування захисту — та отримує винагороду. Далі середовище оновлюється відповідно до обраної дії. У ідеальному випадку процес повторюється доти, доки агент не виконає дію, яка не змінює стан системи, що означає досягнення граничного чи передаварійного режиму. На практиці прийнято обмежуватися сценаріями, де одночасно може бути відключено не більше  $k$  ліній, оскільки ймовірність виникнення пошкоджень на значно більшій кількості ліній одночасно є вкрай низькою.

Визначення стану, дії та винагороди в цій постановці такі:

**Стан:** конфігурація системи та поточний режим роботи, що включає місце розташування захисту, матрицю суміжності із самозв'язками, матрицю опорів вузлів і матрицю мінімальних електричних відстаней. Елементи останньої відображають мінімальну електричну відстань між двома шинами, розраховану за алгоритмом Дейкстри.

**Дія:** вибір агентом будь-якої працюючої лінії, що не перебуває під захистом, для відключення, або збереження поточного стану без змін.

**Винагорода:** різниця між струмом короткого замикання до та після дії агента. Якщо струм збільшується — винагорода позитивна, якщо зменшується — нараховується штраф.

Графова нейронна мережа з ГНП складається з двох частин: напрямної мережі та мережі цінності. Обидві побудовані з графових згорткових і повноз'язних шарів (див. рис. 2). На вхід кожна мережа отримує один і той самий стан середовища. Для системи з  $n$  вузлами довжина вектору ознак кожного вузла становить  $3n$ : перші  $n$  координат відображають топологічні зв'язки, другі  $n$  — власні та взаємні опори, треті  $n$  — мінімальні електричні відстані між шиною та іншими вузлами.

Вихідний розмір напрямної мережі дорівнює кількості ліній у системі. Кожен вихідний елемент відповідає конкретній лінії. Якщо значення виходу не перевищує 0.5 — лінія не активується й не розглядається для відключення. Інакше вибираються  $k$  ліній із найбільшими вихідними значеннями, що формують прогнозований граничний чи передаварійний режим. Якщо кількість активних виходів менша за  $k$ , то у прогнозований режим включаються всі лінії з виходом понад 0.5.

Мережа цінності реалізує структуру нейромережі з ГНП: спочатку обчислюються цінність стану та перевага дії, після чого вони комбінуються для отримання функції стан-дія. Для системи з  $m$  лініями передавання вихідний розмір дорівнює  $m$ , і кожен елемент відображає значущість відключення відповідної лінії при даному стані. Як дію обирається лінія з максимальною цінністю. Якщо ж мережа цінності пропонує відключити захищену або вже вимкнену лінію, епізод зупиняється, а поточний стан увімкнення/вимкнення ліній фіксується як досягнутий граничний чи передаварійний режим.

**Навчальна структура GLFE.** Для прискорення збіжності запропоновано дворівневу навчальну структуру GLFE. На першому етапі формується невелика кількість навчальних пар на основі перебору. Ознакою вибірки виступає початковий стан системи, а міткою — відповідний граничний чи передаварійний режим, за якого досягається максимальний струм короткого замикання. Ці режими отримуються шляхом перебору комбінацій станів увімкнення/вимкнення ліній. Кожен елемент відображає стан конкретної лінії: 1 означає її відключення, 0 — роботу в мережі. Напрямна мережа навчається у режимі з учителем, використовуючи функцію втрат бінарної крос-ентропії, щоб набути здатності прогнозувати граничні та передаварійні режими. Далі вона використовується для корекції навчання мережі цінності, що дозволяє пришвидшити збіжність

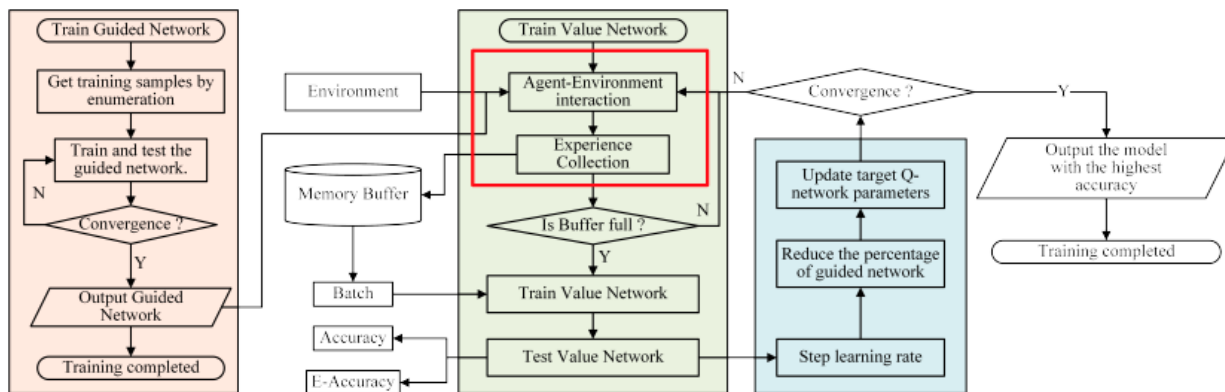


Рисунок 3. Діаграма запропонованої GLPE для тренування нейромережі

Мережа цінності тренується у напівконтрольованому режимі за допомогою прямої мережі. Частина дій задається прямою мережею:  $k$  послідовних кроків формують прогнозований граничний чи перед аварійний режим. Інша частина дій визначається самою мережею цінності із застосуванням стратегій дослідження. На початкових етапах роль прямої мережі є вагомою, але поступово її вплив зменшується зі зростанням точності моделі. Функція втрат обчислюється як середньоквадратична помилка. Додатково застосовується стратегія повторного використання досвіду: усі результати зберігаються у буфері у вигляді кортежів  $\langle st, at, rt, st+1, dt \rangle$ . Коли буфер заповнюється, з нього вибираються батчі для подальшого тренування. Важливо відзначити, що елементи граничного чи перед аварійного режиму є рівнозначними, незалежними від послідовності дій, тому коефіцієнт затухання  $\gamma$  встановлюється рівним 1, щоб уникнути впливу порядку вибору дій.

---

**Algorithm 1** Extended Exploration Strategy
 

---

Set the Number  $n$  of Actions to Explore.  
**Initialization:** the state  $s$  of the environment.  
 Get values of actions by **Value Network**.  
 Sort the values and select the top  $n$  actions.  
**For**  $a$  in actions:  
   **do**  $a$   
     Environment updated to  $s'$ .  
     Return reward  $r$  and done  $d$ .  
     Record  $(s, a, s', r, d)$  in Memory Buffer.  
   **If** not  $d$ :  
      $n = n - 1$   
     **If**  $n > 0$ :  
       **Execute** this Strategy under  $s'$ .  
     **End If**  
**End If**  
**End for**

---

**Рисунок 4.** Алгоритм стратегії розширеного дослідження перед аварійних режимів в енергосистемах

Для додаткового прискорення навчання застосовується розширена стратегія дослідження. Традиційні методи дозволяли виконувати лише одну дію у заданому стані, що значно подовжувало процес. Нова стратегія, описана в алгоритмі (рис.4), передбачає перевірку кількох дій в одному стані середовища. Це особливо ефективно для задач із короткими епізодами, коли завершення настає після кількох кроків. Однак зі зростанням довжини епізоду час пошуку значно збільшується. Кількість досліджуваних дій  $n$  виступає критичним гіперпараметром; у даній роботі обрано близько 10% від розмірності простору дій.

У процесі навчання мережі цінності в режимі реального часу підлягають корекції такі параметри: частка дій, що задаються прямою мережею, швидкість навчання та необхідність оновлення параметрів цільової Q-мережі. У цій роботі зазначені операції

виконуються після завершення кожного циклу навчання. Відповідно, вся навчальна структура графової нейронної мережі з ГНП формалізована так, як показано на рис.б 7, де ключовим компонентом є саме GLFE, виділений червоним (див. рис.5).

---

**Algorithm 2** Guided Learning and Free Exploration
 

---

Assign Ratios to Guided Learning and Free Exploration.  
**Initialization:** randomize the state  $s$  of the environment.  
**If** Guided Learning:  
   Get actions by **Guide Network**.  
   **For** action  $a$  in actions:  
     **do**  $a$   
       Environment updated to  $s'$ .  
       Return reward  $r$  and done  $d$ .  
        $d = \text{TRUE}$  if  $a$  is the final else FALSE.  
       Record  $(s, a, s', r, d)$  in the buffer.  
     **End For**  
**Else** Free Exploration:  
   **While**  $d$ :  
     **Execute** Extended Exploration Strategy under  $s$ .  
   **End While**  
**End If**

---

**Рисунок 5.** Алгоритм для керованого навчання та вільного дослідження перед аварійних режимів в енергосистемах

Варто наголосити, що пряма мережа безпосередньо видає прогнозований граничний чи передаварійний режим на основі вхідного стану системи, тоді як мережа цінності діє інакше: вона послідовно відключає по одній лінії, кожного разу враховуючи оновлений стан середовища, доки не буде досягнуто фінального стану епізоду. Це означає, що мережа цінності реалізує рекурсивний пошук граничних та передаварійних режимів.

**Експерименти та обговорення.** У цьому розділі проведено перевірку запропонованої графової нейронної мережі з ГНП на практичній задачі визначення граничних та передаварійних режимів для розрахунку уставок миттєвих струмових реле. Для цього виконано три типи досліджень: експерименти на ефективність, порівняльні тести та абляційний аналіз, реалізовані на еталонній системі IEEE 39-шин.

Експерименти спочатку проведено на тестовій системі IEEE 39-шин, щоб перевірити ефективність запропонованої графової нейронної мережі з ГНП у вирішенні задачі пошуку граничних та передаварійних режимів. Система включає 39 шин і 34 лінії електропередачі. Початковий режим роботи задавався випадково у діапазоні  $N - 3$ , тобто з 0 до 3 ліній виведених із роботи. Максимальна кількість одночасно відключених ліній  $k$  була обмежена трьома. Відповідно, область пошуку в експерименті охоплювала всі режими в межах  $N - 6$ .

Для тестів ефективності пряма мережа була реалізована у вигляді двох графових згорткових шарів, двох повнозв'язних шарів та вихідного шару з



функцією активації сигмоїда. Мережа цінності містила два графові згорткові та три повнозв'язні шари. Гіперпараметри моделі графової нейронної мережі з ГНП були визначені методом сіткового пошуку і надалі використовувались також у наступних ітераціях тестування.

Криві втрат і точності для прямої та ціннісної мереж подано на рис. 7. Точність прямої мережі склала 80,3%, що свідчить про її здатність певною мірою прогнозувати граничні та передаварійні режими. У сценарії з алгоритму за рис.5 екстремальні струми короткого замикання було розраховано для всіх захистів у 20 початкових комбінаціях увімкнення/вимкнення ліній, що дало 630 початкових станів системи. Результати підтвердили, що точність мережі цінності перевищує 90%, а показник е-точності сягає понад 98%. Це підтверджує дієвість запропонованого методу на основі ГНП для знаходження граничних та передаварійних режимів.

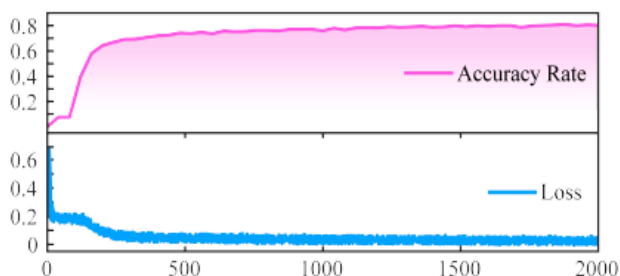


Рисунок 6. Точність і криві втрат мережі направляючих у системі з 39 шинами

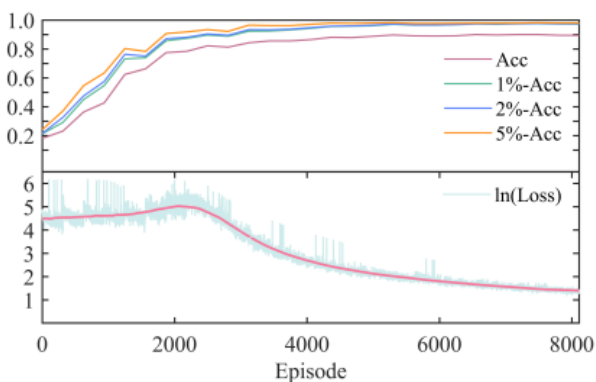


Рисунок 7. Точність і криві втрат мережі цінності в системі з 39 шинами

Крім того, загальна кількість можливих режимів у діапазоні  $N - 6$  дорівнює 47 322 628. Проте напівконтрольована навчальна структура GLFE потребувала лише 12 000 зразків, отриманих повним перебором, для тренування прямої мережі та 129 601 різного стану в межах  $N - 6$  для навчання мережі цінності. Таким чином, було використано лише 0,273% від усіх можливих випадків, але при цьому запропонована графова нейронна мережа з ГНП досягла понад 90% точності. Це ще раз демонструє ефективність розроб-

леного методу визначення граничних та передаварійних режимів.

#### IV. ВИСНОВКИ

У цій роботі запропоновано новий метод на основі глибинного навчання з підкріпленням для швидкого пошуку граничних та передаварійних режимів при розрахунку уставок релейного захисту. Розроблена архітектура, названа графова нейронна мережа з ГНП, поєднує можливості графових нейронних мереж для вилучення структурної інформації енергосистеми та механізми глибинного підкріплювального навчання для формування оптимальної стратегії дій. Додатково було створено дворівневу навчальну структуру GLFE (кероване навчання та вільне дослідження), яка підвищує стабільність збіжності.

Ефективність і масштабованість запропонованого підходу підтверджено на тестових системах IEEE з 39 шинами. Порівняння з наявними методами пошуку граничних та передаварійних режимів показало, що розроблена графова нейронна мережа з ГНП забезпечує прийнятний рівень точності, відповідає вимогам селективності захисту та водночас суттєво прискорює обчислення. Варто відзначити, що цей підхід може бути легко адаптований і до інших задач пошуку граничних та передаварійних режимів, достатньо лише коректно побудувати середовище та функції винагороди відповідно до специфіки задачі.

Напрямами подальших досліджень є підвищення узагальнюваності та масштабованості методу, а також його застосування до ширшого кола задач, що потребують пошуку граничних та передаварійних режимів..

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Mishra A., Shukla S. A comprehensive review on deep learning techniques in power system protection: Trends, challenges, applications and future directions // *Electric Power Systems Research*. – 2025. – Vol. 229. – P. 110163. DOI: 10.1016/j.eprsr.2025.110163.
- [2] Fang J., Zhang X. Research on power system relay protection method based on machine learning algorithm // *E3S Web of Conferences*. – 2019. – Vol. 118. – P. 01038. DOI: 10.1051/e3sconf/201911801038.
- [3] López-Cardona A., Bernardez G., Barlet-Rose P., Cabellos-Aparicio A. Proximal policy optimization with graph neural networks for optimal power flow // *Proceedings of 14th International Conference on Data Science (DATA 2025)*. – 2025. – P. 45–56. DOI: 10.5220/0013462700003763.
- [4] Kulikov A., Kryukov A., Malygin I., Bystrov D., Shandarova E. Relay protection and automation algorithms of electrical networks based on simulation and machine learning methods // *Energies*. – 2022. – Vol. 15(18). – P. 6525. DOI: 10.3390/en15186525.
- [5] Zhou L., Li J., Wang S. Optimal power flow for high

- spatial and temporal resolution with GNN-DRL in systems with renewables // *Energies*. – 2025. – Vol. 18(7). – P. 1809. DOI: 10.3390/en18071809.
- [6] Murugesan A., Rao A., Zhang Y. Machine learning-driven intelligent voltage control in RES-integrated systems // *Electric Power Systems Research*. – 2025. – Vol. 233. – P. 110269. DOI: 10.1016/j.epsr.2025.110269.
- [7] Shobole A.A., Hassan K., Ahmed R. Multi-agent system based adaptive numerical relay design // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. – 2024. – Vol. 155. – P. 109540. DOI: 10.1016/j.ijepes.2024.109540.
- [8] Sarajcev P., Dujic D., Baric A. Machine learning classifier for supporting generator's underimpedance (21G) and out-of-step (78) protection functions // *Energies*. – 2024. – Vol. 17(8). – P. 1820. DOI: 10.3390/en17081820.
- [9] Porawagamage G., Dharmapala K., Chaves J.S., Villegas D., Rajapakse A. A review of machine learning applications in power system protection and emergency control: Opportunities, challenges, and future directions // *Frontiers in Smart Grids*. – 2024. – Vol. 1. – P. 1371153. DOI: 10.3389/frsgr.2024.1371153.
- [10] Chen Y., Zhang L., Li M. Artificial Intelligence/Machine Learning Technology in Power System Applications. – PNNL Technical Report PNNL-35735. – 2024. – 112 p. DOI: 10.2172/2334567.
- [11] Ghamizi S., Bojchevski A., Ma A., Cao J. SafePowerGraph: Safety-aware evaluation of graph neural networks for transmission power grids // *arXiv preprint*. – 2024. – arXiv:2407.12421.
- [12] Hansen J.B., Anfinson S.N., Bianchi F.M. Power flow balancing with decentralized graph neural networks // *arXiv preprint*. – 2021. – arXiv:2111.02169.
- [13] Maiti S., Dey S. Smart grid security: A verified deep reinforcement learning framework to counter cyber-physical attacks // *arXiv preprint*. – 2024. – arXiv:2409.15757.
- [14] Pei Y., Wang Q., Liu H. An emergency control strategy for undervoltage load shedding based on a graph deep reinforcement learning method named GraphSAGE-D3QN // *IET Generation, Transmission & Distribution*. – 2023. – Vol. 17(5). – P. 789–799. DOI: 10.1049/gtd2.12795.
- [15] Yuan Y., Li T., Wang Y. Deep reinforcement learning for power system transient stability control // *IEEE Transactions on Power Systems*. – 2020. – Vol. 35(4). – P. 3130–3140. DOI: 10.1109/TPWRS.2019.2963725.
- [16] Liu Z., Zhao J., Zhang Y. Graph convolutional networks for fault location in power distribution systems // *IEEE Transactions on Smart Grid*. – 2022. – Vol. 13(1). – P. 789–799. DOI: 10.1109/TSG.2021.3098361.
- [17] Karimi H., Li Z., Hong S.H. A hybrid machine learning and optimization approach for adaptive protection in microgrids // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. – 2021. – Vol. 125. – P. 106458. DOI: 10.1016/j.ijepes.2020.106458.
- [18] Wang J., Sun Y., Chen C. Reinforcement learning-based optimal control for power system frequency regulation // *IEEE Access*. – 2021. – Vol. 9. – P. 14567–14577. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3053456.
- [19] Zhang X., Zhou M., Li H. Fault diagnosis in smart grids using graph neural networks // *Applied Energy*. – 2023. – Vol. 341. – P. 121037. DOI: 10.1016/j.apenergy.2023.121037.
- [20] Xu K., He Y., Tang F. Deep Q-learning for adaptive overcurrent relay coordination in distribution systems // *Electric Power Components and Systems*. – 2022. – Vol. 50(15). – P. 1689–1701. DOI: 10.1080/15325008.2022.2106765.

Надійшла (Received) 02.08.2025;

Прийнята (Accepted) 18.09.2025;

Опублікована (Published) 22.10.2025;

## WAY TO IMPLEMENTATION IN RELAY PROTECTION OF THE ALGORITHM FOR SEARCHING FOR PRE-FAULT OPERATING CONDITIONS BY USING A NEURAL NETWORK WITH BACKPROPAGATION SPOT TRAINING

TSIUPA V.M.

Postgraduate student, Department of Electrical Power Transmission, National Technical University 'Kharkiv Polytechnic Institute'; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4269-1941>; e-mail: [vladyslav.tsiupa@ieee.khpi.edu.ua](mailto:vladyslav.tsiupa@ieee.khpi.edu.ua) ;

DANYLCHENKO D.O.

Professor, Department of Electrical Power Transmission, National Technical University 'Kharkiv Polytechnic Institute'; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7912-1849>; e-mail: [dmytro.danylchenko@khpi.edu.ua](mailto:dmytro.danylchenko@khpi.edu.ua) ;

**Purpose.** The purpose of this paper is to develop and validate a novel method for searching critical and pre-fault operating conditions in power systems for relay protection setting calculation. The proposed approach is based on the integration of graph neural networks with deep reinforcement learning (GNN-DRL) and aims to significantly reduce computational time while maintaining high accuracy and ensuring protection selectivity.

**Findings.** It is demonstrated that the proposed GNN-DRL method achieves a 10–1000 times reduction in computational overhead compared to traditional brute-force approaches. The prediction accuracy exceeds 90%, while e-accuracy surpasses 98%. The method proves to be highly effective both in determining maximum fault currents for instantaneous overcurrent protection and in large-scale scenarios on extended test systems.

**Originality.** For the first time, the integration of graph neural networks with the Dueling Double Deep Q Network algorithm is proposed to solve the problem of searching for critical and pre-fault operating conditions in relay protection. A unique two-stage training framework, GLFE, is developed, combining elements of supervised and unsupervised learning. This enables high prediction accuracy while requiring significantly fewer training samples.

**Practical value.** The results of this study can be applied in the design of intelligent relay protection and automation systems for electric power networks. The proposed method is capable of adapting to fast-changing conditions in power systems with high penetration of renewable energy. Furthermore, the architecture can be extended to other optimization and control problems in complex energy environments.

**Keywords:** limit and pre-emergency modes, relay protection, graph neural networks, reinforcement learning, power systems, electric power engineering.

## REFERENCES

- [1] Mishra, A., & Shukla, S. (2025). A comprehensive review on deep learning techniques in power system protection: Trends, challenges, applications and future directions. *Electric Power Systems Research*, 229, 110163. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2025.110163>
- [2] Fang, J., & Zhang, X. (2019). Research on power system relay protection method based on machine learning algorithm. *E3S Web of Conferences*, 118, 01038. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911801038>
- [3] López-Cardona, A., Bernardez, G., Barlet-Rose, P., & Cabellos-Aparicio, A. (2025). Proximal policy optimization with graph neural networks for optimal power flow. In *Proceedings of the 14th International Conference on Data Science (DATA 2025)* (pp. 45–56). <https://doi.org/10.5220/0013462700003763>
- [4] Kulikov, A., Kryukov, A., Malygin, I., Bystrov, D., & Shandarova, E. (2022). Relay protection and automation algorithms of electrical networks based on simulation and machine learning methods. *Energies*, 15(18), 6525. <https://doi.org/10.3390/en15186525>
- [5] Zhou, L., Li, J., & Wang, S. (2025). Optimal power flow for high spatial and temporal resolution with GNN-DRL in systems with renewables. *Energies*, 18(7), 1809. <https://doi.org/10.3390/en18071809>
- [6] Murugesan, A., Rao, A., & Zhang, Y. (2025). Machine learning-driven intelligent voltage control in RES-integrated systems. *Electric Power Systems Research*, 233, 110269. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2025.110269>
- [7] Shobole, A. A., Hassan, K., & Ahmed, R. (2024). Multi-agent system based adaptive numerical relay design. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 155, 109540. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2024.109540>
- [8] Sarajcev, P., Dujic, D., & Baric, A. (2024). Machine learning classifier for supporting generator's underimpedance (21G) and out-of-step (78) protection functions. *Energies*, 17(8), 1820. <https://doi.org/10.3390/en17081820>
- [9] Porawagamage, G., Dharmapala, K., Chaves, J. S., Villegas, D., & Rajapakse, A. (2024). A review of machine learning applications in power system protection and emergency control: Opportunities, challenges, and future directions. *Frontiers in Smart Grids*, 1, 1371153. <https://doi.org/10.3389/frsgr.2024.1371153>
- [10] Chen, Y., Zhang, L., & Li, M. (2024). Artificial Intelligence/Machine Learning Technology in Power System Applications (PNNL Technical Report PNNL-35735). <https://doi.org/10.2172/2334567>
- [11] Ghamizi, S., Bojchevski, A., Ma, A., & Cao, J. (2024). SafePowerGraph: Safety-aware evaluation of graph neural networks for transmission power grids. *arXiv preprint*, arXiv:2407.12421.
- [12] Hansen, J. B., Anfinsen, S. N., & Bianchi, F. M. (2021). Power flow balancing with decentralized graph neural networks. *arXiv preprint*, arXiv:2111.02169.
- [13] Maiti, S., & Dey, S. (2024). Smart grid security: A verified deep reinforcement learning framework to counter cyber-physical attacks. *arXiv preprint*, arXiv:2409.15757.
- [14] Pei, Y., Wang, Q., & Liu, H. (2023). An emergency control strategy for undervoltage load shedding based on a graph deep reinforcement learning method named GraphSAGE-D3QN. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 17(5), 789–799. <https://doi.org/10.1049/gtd2.12795>
- [15] Yuan, Y., Li, T., & Wang, Y. (2020). Deep reinforcement learning for power system transient stabil-

- ity control. *IEEE Transactions on Power Systems*, 35(4), 3130–3140.  
<https://doi.org/10.1109/TPWRS.2019.2963725>
- [16] Liu, Z., Zhao, J., & Zhang, Y. (2022). Graph convolutional networks for fault location in power distribution systems. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 13(1), 789–799.  
<https://doi.org/10.1109/TSG.2021.3098361>
- [17] Karimi, H., Li, Z., & Hong, S. H. (2021). A hybrid machine learning and optimization approach for adaptive protection in microgrids. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 125, 106458. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106458>
- [18] Wang, J., Sun, Y., & Chen, C. (2021). Reinforcement learning-based optimal control for power system frequency regulation. *IEEE Access*, 9, 14567–14577.  
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3053456>
- [19] Zhang, X., Zhou, M., & Li, H. (2023). Fault diagnosis in smart grids using graph neural networks. *Applied Energy*, 341, 121037.  
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121037>
- [20] Xu, K., He, Y., & Tang, F. (2022). Deep Q-learning for adaptive overcurrent relay coordination in distribution systems. *Electric Power Components and Systems*, 50(15), 1689–1701.  
<https://doi.org/10.1080/15325008.2022.210676>