



Науковий журнал

ЕЛЕКТРОТЕХНІКА та ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА

№1'2025

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

Виходить 4 рази на рік

Запоріжжя

2025

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

ЗАКОРДОННІ ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ
КОЛЕГІЇ

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

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

ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ (Україна)

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

Журнал включено до міжнародних наукометричних баз, каталогів та систем пошуку: Index Copernicus, CrossRef; Directory of Open Access Journals (DOAJ); OpenAIRE; Public Knowledge Project (PKP); ResearchBib - Academic Resource Index; Scientific Indexing Services (SIS); Ulrich's Periodicals Directory; WorldCat; Наукова періодика України – проект Національної бібліотеки України імені В. І. Вернадського (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 КВ №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 22.04.2025 за рекомендацією вченої ради Національного університету "Запорізька політехніка" (протокол №9 від 25.04.2025 р.). Формат 60x84/8. Ум. Др. Арк. 6,98. Тираж 300 прим. Зам. №386.

ZAPORIZHZHIA POLYTECHNIC NATIONAL UNIVERSITY



Scientific journal

ELECTRICAL ENGINEERING & POWER ENGINEERING

№1 '2025

Founded by Zaporizhzhia Polytechnic National University in May 1999

4 issues per year

Zaporizhzhia

2025

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

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

FOREIGN MEMBERS OF EDITORIAL BOARD

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

MEMBERS OF EDITORIAL BOARD (Ukraine)

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

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

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

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

Founder and editor: Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia. Certificate of publisher Civil Code №6952 dated October 22, 2019.
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 April 22, 2025 on the recommendation of the academic council of the Zaporizhzhia Polytechnic National University (Protocol No.9 dated April 25, 2025). Sheet size 60x84/8. Cond. Print. Sheets 6,98. Number of copies printed 300. Rep. № 386.

ЗМІСТ

I ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

Коваленко М.А., Коваленко І.Я., Тітов Є.О., Базаров О.О.

Експлуатація автономних електромеханічних перетворювачів малої та середньої потужності.....7

Синецький А.В., Коцур І.М.

Особливості мінімізації сумарних електричних втрат високовольтних електромеханічних систем для стаціонарних установок промислових вентиляторів.....17

Сідєлев М.І.

Автоматизація досліджень генераторів імпульсного струму на основі топологічно-ізоморфної моделі25

II ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА

Рева В.С., Лисенко О.Г., Удовик О.В.

Особливості створення систем контролю якості електроенергії в системах електропостачання космічних ракетних комплексах32

Олійніченко М. Ю., Бялобржеський О.В., Постіл А. О.

Дослідження потокорозподілу в мікромережі з розосередженими джерелами електричної енергії.....42

Папайка Ю.А., Лисенко О.Г., Малишко М.М., Буртний Д.І., Удовик О.В.

Дослідження характеру аварійних перехідних процесів у системах електропостачання підприємств.....53

CONTENTS

I ELECTRICAL ENGINEERING

Kovalenko M.A., Kovalenko I.Y., Titov Y.O., Bazarov O.O.

Operation of autonomous electromechanical converters of low and medium power.....7

Synetskyi A.V., Kotsur I.M.

Features of minimizing total electrical losses in high-voltage electromechanical systems for stationary industrial fan installations17

Sidelev N.I.

Automation of studies of pulsed current generators based on the topological-isomorphic model....25

II POWER ENGINEERING

Reva V.S., Lysenko O.G., Udovyk O.V.

Features of the creation of electric power quality control systems in power supply systems of space rocket complexes.....32

Oliynichenko M.Y., Bialobrzheskyi O.V., Postil A.O.

Research on power distribution in a microgrid with distributed electricity sources.....42

Papaika Yu.A., Lysenko O.G., Malyshko M.M., Burtnyi D.I., Udovyk O.V.

Study of the nature of emergency transient processes in power supply systems of enterprises.....53

621.313.322-843.6

ЕКСПЛУАТАЦІЯ АВТОНОМНИХ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ МАЛОЇ ТА СЕРЕДНЬОЇ ПОТУЖНОСТІ

- КОВАЛЕНКО М.А. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електромеханіки національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” Київ, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5602-2001>, e-mail: kovalenko_ma@i.ua;
- КОВАЛЕНКО І.Я. старший викладач, PhD, кафедри відновлювальних джерел енергії національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” Київ, Україна, ORCID <https://orcid.org/0000-0003-1097-2041>, e-mail: 2048141@ukr.net;
- ТИТОВ Є.О. аспірант кафедри електромеханіки національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” Київ, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-8222-7477>, e-mail: egor.shabadash@gmail.com;
- БАЗАРОВ О.О. аспірант кафедри електромеханіки національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” Київ, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-8491-2678>, e-mail: bazarov.oleh@gmail.com.

Мета роботи. Метою роботи є здійснення всебічного аналізу статистичних даних щодо поломок бензинових та дизельних автономних електромеханічних установок для виявлення закономірностей і ключових причин несправностей.

Методи дослідження. Методи статистичного аналізу, класичні методи розрахунку синхронних явнопольних генераторів із електромагнітним збудженням.

Отримані результати. Проведено аналіз статистики відмов автономних електромеханічних перетворювачів малої та середньої потужності. Отримані результати підкреслюють необхідність впровадження систем моніторингу стану генераторів для раннього виявлення несправностей. Регулярна діагностика та контроль навантаження допоможуть запобігти критичним поломкам та збільшити термін служби обладнання. Зібрані статистичні дані можна використовувати для розробки ефективних профілактичних заходів, удосконалення інструкцій з технічно-го обслуговування та оптимізації режимів експлуатації генераторів. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на розробку алгоритмів автоматичного розподілу навантаження між фазами, вдосконалення систем захисту та підвищення надійності ізоляційних матеріалів. Аналіз статистики несправностей дизельних і бензинових генераторів показав, що електричні поломки становлять 51% випадків, а механічні – 49%. Це свідчить про приблизно рівномірний розподіл між двома категоріями несправностей, що вказує на необхідність комплексного підходу до обслуговування та діагностики. При використанні даних установок у військових цілях баланс поломок зміщується: механічні відмови: 75-85%, електричні відмови: 15-25%. Серед електричних несправностей найбільш поширеними є пошкодження обмоток статора через асиметрію навантаження, вихід з ладу регуляторів напруги, несправності акумуляторної системи та порушення ізоляції електропроводки. Механічні поломки найчастіше пов'язані зі зносом поршневої групи, недостатнім змащенням, перегрівом двигуна через несправності системи охолодження та порушеннями у роботі паливної системи.

Наукова новизна. Проведено детальне узагальнення досвіду експлуатації автономних електромеханічних перетворювачів у реальних умовах, що дозволило встановити закономірності їхньої роботи, виявити типові проблеми та розробити рекомендації щодо їх усунення. Запропоновані у дослідженні методи оцінки ефективності роботи автономних електромеханічних перетворювачів можуть бути використані для подальшої модернізації існуючих систем, а також при створенні нових високоефективних автономних електрогенеруючих установок.

Практична цінність. Результати дослідження мають практичну цінність для інженерів, користувачів та виробників електромеханічного обладнання. Одержані результати можуть використовуватись для підвищення ефективності та надійності автономних енергетичних систем, що працюють у різних умовах. Зокрема, можливо зменшити витрати на технічне обслуговування, покращити енергоефективність та подовжити термін експлуатації обладнання. Отримані результати можуть використовуватись при розробці рекомендацій щодо вибору, модернізації та діагностики автономних електромеханічних установок.

Ключові слова: автономні електромеханічні перетворювачі, електрогенеруючі пристрої, експлуатація, енергоефективність, надійність, технічне обслуговування, електропостачання, генераторні системи.

I. ВСТУП

В умовах постійних обстрілів критичної інфраструктури України автономні електромеханічні перетворювачі (АЕП), зокрема дизель-генераторні установки (ДГУ) та бензогенераторні установки, стали життєво необхідними для забезпечення безперебійного електропостачання, дозволяючи лікарям, школам та іншим важливим установам продовжувати роботу, а також забезпечуючи базові потреби населення, такі як освітлення та опалення [1]. АЕП, ДГУ та бензогенератори підтримують роботу зв'язку та інтернету, що критично важливо для координації дій та отримання інформації, а їхня автономність допомагає підтримувати стійкість та функціонування суспільства в умовах війни [2], [3].

ДГУ, як автономні джерела електроенергії, що працюють на дизельному паливі, стали критично важливими для України, де російські обстріли регулярно пошкоджують енергетичну інфраструктуру. Їхня автономність, мобільність, надійність, широкий діапазон потужностей та швидкий запуск роблять їх незамінними для забезпечення безперебійного електропостачання критичної інфраструктури, військових об'єктів, промислових підприємств та побутових потреб [4].

Бензогенераторні установки, що працюють на бензині, також відіграють важливу роль у забезпеченні електроенергією [5]. Вони особливо корисні для невеликих домогосподарств, малих підприємств та в умовах, де потрібна мобільність та швидкий запуск. Бензогенератори, як правило, є меншими та легшими, ніж ДГУ, що робить їх зручними для транспортування та використання в різних умовах.

Крім того, АЕП, ДГУ та бензогенератори забезпечують роботу насосних станцій водопостачання та каналізації, підтримують транспортну інфраструктуру, дозволяючи працювати світлофорам, залізничним станціям та аеропортам, і дають можливість промисловим підприємствам виробляти товари першої необхідності, такі як продукти харчування та медикаменти [6].

Однак важливо пам'ятати, що АЕП, ДГУ та бензогенератори можуть виходити з ладу через інтенсивне використання або недостатнє обслуговування, що підкреслює необхідність регулярного технічного огляду та ремонту, включаючи перевірку рівня масла та охолоджуючої рідини, очищення фільтрів, перевірку електричних з'єднань та тестування роботи під навантаженням. Окрім того, в умовах використання ДГУ та бензогенераторів, дуже важливим стає питання паливної безпеки, правильного зберігання палива та вентиляції. Також, потрібно враховувати шумове забруднення, що створюється ДГУ та бензогенераторами, особливо в умовах густонаселених міст [7].

В умовах війни в Україні, ДГУ та бензогенератори стали не просто джерелом резервного електропостачання, а життєво необхідним елементом забезпечення стійкості та виживання країни.

II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Генератори електроенергії широко використовуються для забезпечення електроживлення у разі відсутності централізованого постачання. Основними типами таких пристроїв є дизельні та бензинові генератори. Вони працюють на основі внутрішнього згоряння палива та перетворення механічної енергії у електричну. Бензиновий генератор працює на основі бензинового двигуна внутрішнього згоряння. Паливо подається в карбюратор або систему упорскування, де змішується з повітрям, після чого отримана паливно-повітряна суміш запалюється іскрою свічки запалювання, що викликає вибухове згоряння [8]. Утворені гази розширюються, приводячи в рух поршень, який передає механічну енергію на колінчастий вал. Обертальний момент передається на ротор генератора, що індукуює електричний струм у статорах. Бензинові генератори зазвичай мають меншу потужність і застосовуються для короткочасного використання або в побутових умовах через їх відносно невисоку витрату палива та менший рівень шуму [9].

Дизельний генератор використовує дизельний двигун внутрішнього згоряння, який працює за принципом самозаймання пального під дією високої температури стискання [10]. У камеру згоряння подається чисте повітря, яке стискається поршнем до високого тиску, що значно підвищує його температуру. У стиснене гаряче повітря подається дизельне паливо, яке самозаймається без необхідності іскрового запалювання [11], [12]. Утворені гази розширюються, приводячи в рух поршень, який через кривошипно-шатунний механізм обертає колінчастий вал. Механічна енергія передається на генератор, де перетворюється в електричний струм. Дизельні генератори мають вищу ефективність і потужність, тому їх використовують у промислових масштабах та для тривалого автономного живлення [13].

Як бензинові, так і дизельні генератори можуть мати певні слабкі місця. Паливна система може виходити з ладу через засмічення паливного фільтра або несправність форсунок, що спричиняє нестабільну роботу. Перегрів двигуна через недостатнє охолодження може призвести до його виходу з ладу. Електрична система піддається зносу через проблеми з реле-регулятором або стартером, а масляна система, при недостатньому рівні масла або його забрудненні, спричиняє підвищений знос деталей двигуна. Акумуляторна батарея також може втратити ємність або мати окислені контакти, що

ускладнює запуск генератора [14]. Саме тому аналіз можливих поломок є критично важливим для забезпечення безперебійної роботи генераторів. Регулярна діагностика дозволяє виявити проблеми на ранніх етапах і уникнути серйозних несправностей, що можуть призвести до значних фінансових витрат і втрати працездатності пристрою. Важливо стежити за станом основних вузлів і проводити планове технічне обслуговування, щоб подовжити термін служби генератора та забезпечити його стабільну роботу в будь-яких умовах [15].

Обидва типи генераторів мають свої переваги та сфери застосування. Бензинові генератори підходять для короткочасного використання та невеликих навантажень, тоді як дизельні забезпечують вищу потужність та економічність при довготривалій роботі. Вибір між ними залежить від умов експлуатації, потреб користувача та економічної доцільності. При цьому, важливо враховувати потенційні проблеми у вузлах генераторів та проводити своєчасне обслуговування для продовження їх ресурсу.

III. МЕТА РОБОТИ

Метою роботи є здійснення всебічного аналізу статистичних даних щодо поломок бензинових та дизельних автономних електромеханічних установок для виявлення закономірностей і ключових причин несправностей.

IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГУ МАТЕРІАЛУ І АНАЛІЗ ОТРИМАННИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Статистичні дані, щодо типів поломок, несправностей та виходу з ладу автономних дизель-бензинових енергоустановок отримано за підтримки профільних підприємств та товариств: ПП «Стандарт-Електро» та ТОВ «Геко-центр». Зокрема, інформацію отримано з ремонтних журналів, актів виконаних робіт та записів у журналах в період з 2023 по кінець 2024 року включно.

Досвід експлуатації електромеханічних перетворювачів малої та середньої потужності показує, що причиною виходу з ладу таких перетворювачів є механічні та електричні несправності, що показано на рис. 1.1.

Крім того, для автономних електромеханічних перетворювачів, що використовуються для потреб військових, механічна частина зазвичай виходить з ладу частіше (75-85% відмов), ніж електрична (15-25% відмов), це пояснюється наступними особливостями їх експлуатації:

1. Такі генератори працюють у складних умовах: пил, волога, високі та низькі температури, механічні навантаження та вібрації. Це призводить до прискореного зношування рухомих механізмів, таких як поршнева група, підшипники, клапани, муфти

тощо.

2. Високе навантаження та часті пуски/зупинки. На відміну від генераторів, що працюють у цивільних умовах, які часто працюють у стабільному режимі, військові установки піддаються частим ввімкненням та вимкненням, що створює додаткові навантаження на двигун внутрішнього згоряння, стартер, систему змащування та охолодження.

3. Недостатнє технічне обслуговування (ТО) у польових умовах. Регулярне ТО в умовах, що наближені до бойових є ускладнене через відсутність необхідних запчастин, інструментів або кваліфікованого персоналу. В результаті мастило, фільтри та інші витратні матеріали можуть замінюватися несвоєчасно, що підвищує зношування механічних компонентів.

4. Високий рівень механічних навантажень. Військові генератори часто транспортуються у вантажівках, бронетехніці або авіацією, що спричиняє значні ударні та вібраційні навантаження. Це негативно впливає на кріплення, підшипники, амортизуючі елементи та інші механічні вузли.

5. Використання низькоякісного пального та мастильних матеріалів. У військових умовах паливо може містити домішки або буди недостатньої якості, що пришвидшує зношування паливної системи та двигуна. Крім того, неправильний підбір мастильних матеріалів або їх передчасне старіння можуть призвести до надмірного тертя та перегріву.

6. Погане охолодження та пришвидшений знос елементів системи охолодження. У польових умовах можливе засмічення радіаторів пилом і брудом, що знижує ефективність охолодження двигуна та призводить до його перегріву, що є однією з основних причин виходу з ладу механічних вузлів. Крім того, електрогенеруючі установки у польових умовах часто маскуються, що негативно впливає на охолодження та ресурс установки в цілому.

Натомість електрична частина електромеханічних перетворювачів, що працюють для потреб військових (обмотки, регулятори напруги, випрямлячі) зазвичай є менш вразливою, оскільки не має рухомих частин і не піддається таким інтенсивним механічним навантаженням. Однак і вона може виходити з ладу при перегріві, перевантаженнях чи коротких замиканнях, хоча це трапляється рідше, ніж механічні пошкодження.

РІД ВІДМОВ АВТОНОМНИХ ЕМП

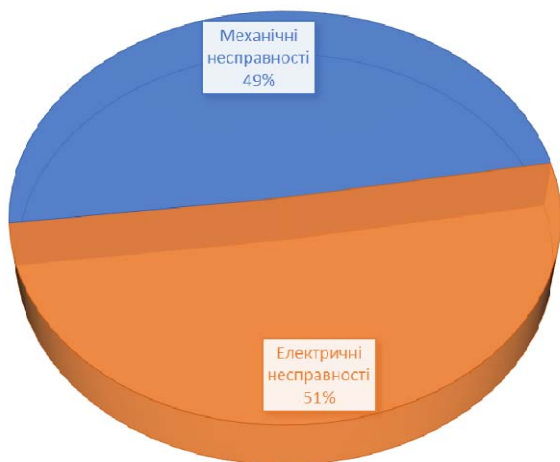


Рисунок 1. Розподілення відмов на електричні та механічні

Механічні несправності поділяються на: несправності системи охолодження/підігріву, несправності блоку двигуна та несправності датчиків. Використовуючи статистику звернень клієнтів у приватні сервісні центри з ремонту автономних електромеханічних установок проведено аналіз розподілення механічних поломок. Це зображено на рис. 2.

МЕХАНІЧНІ НЕСПРАВНОСТІ

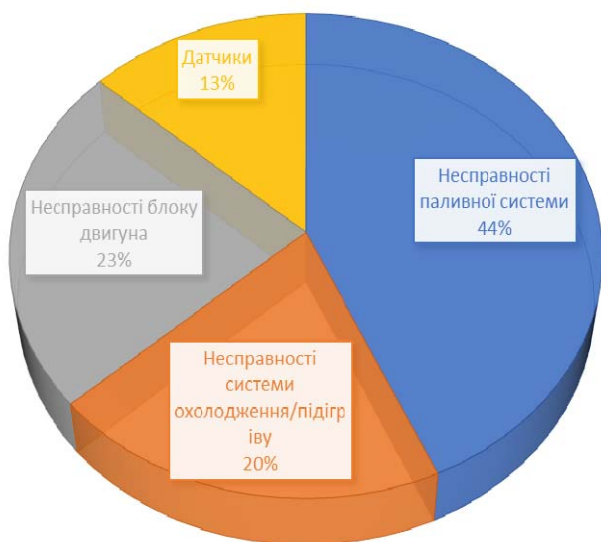


Рисунок 2. Розподілення механічних несправностей

Розширений аналіз механічних несправностей автономних електромеханічних перетворювачів.

В роботі проведено поглиблений аналіз механічних несправностей автономних

електромеханічних перетворювачів, з метою виявлення ключових факторів, що впливають на їх надійність та довговічність.

1. Несправності паливної системи є найбільш поширеними і зумовлені комплексом факторів, які визначаються наступним:

1) Недостатньою періодичністю технічного обслуговування: забруднення фільтрів, накопичення осаду в паливних баках, корозія паливопроводів.

2) Впливом ультрафіолетового випромінювання: руйнування гумових та пластикових компонентів, втрата еластичності ущільнювачів.

3) Якістю матеріалів компонентів: використання неякісних фільтрів, паливопроводів, насосів, що призводить до швидкого зносу та виходу з ладу.

4) Екстремальними умовами експлуатації: робота в умовах високої запиленості, вологості, температурних коливань, що прискорює знос компонентів.

Крім того, що велике значення має якість палива. Використання палива з великим вмістом домішок, або яке не відповідає нормам чи рекомендаціям виробника привідного двигуна, значно прискорює вихід з ладу паливної системи.

2. Несправності системи охолодження/підігріву займають друге місце за частотою виникнення:

а. Складність системи та недоступність внутрішніх компонентів для користувача ускладнюють обслуговування: забруднення радіатора, витік охолоджуючої рідини, вихід з ладу водяного насоса.

б. Основною причиною є низька якість компонентів, що знижує ефективність профілактичного обслуговування: використання неякісних радіаторів, патрубків, термостатів.

с. Варто зазначити, що використання не якісної охолоджуючої рідини, призводить до корозії внутрішніх елементів системи охолодження.

3. Несправності блоку двигуна:

а. Стан двигуна визначається якістю його виготовлення: знос поршневої групи, вихід з ладу підшипників, тріщини в блоці циліндрів.

б. Регулярне технічне обслуговування підтримує функціональність поршневої групи, але не гарантує довговічність механічних компонентів: контроль рівня масла, заміна фільтрів, регулювання клапанів.

с. Необхідно додати, що перегрів двигуна, та робота із використанням неналежного мастила, призводить до швидкого виходу з ладу двигуна внутрішнього згорання.

4. Несправності датчиків наприклад, датчиків тиску мастила, температури охолоджуючої рідини є менш критичними. Вони швидко усуваються спеціалістами сервісних центрів: заміна датчика, перевірка електричних з'єднань. Експлуатаційні умови мають незначний вплив на працездатність

датчиків: вібрація, температурні коливання. Але варто відмітити, що вихід з ладу деяких датчиків, може призвести до критичних пошкоджень двигуна, якщо вчасно не буде виявлено проблему.

Варто відмітити важливість використання якісних мастильних матеріалів для зменшення зносу компонентів. Необхідність регулярної перевірки та заміни фільтрів (паливних, повітряних, масляних). Вплив вібрації на довговічність компонентів та необхідність використання віброізоляційних матеріалів. Контроль електричних з'єднань, також має велике значення, для запобігання виходу з ладу електрообладнання.

Нижче приведено приклад механічної несправності ДГУ (рис. 3).



Рисунок 3. Руйнування шестерні приводу помпи охолодження генератора внаслідок заклинювання підшипника

На рис. 3 показано руйнування шестерні приводу помпи охолодження генератора внаслідок заклинювання підшипника. Розглянемо детальніше дану механічну несправність. По рис. 3 видно значне пошкодження зубів шестерні, що включає сколи та деформації. Це свідчить про те, що шестерня зазнала значного механічного впливу. У нижній частині фотографії (рис. 3) видно частину корпусу помпи

охолодження. Це дає змогу ідентифікувати пошкоджену шестерню як частину приводу помпи. У центрі шестерні розташований підшипник. Ймовірно, саме клин підшипника спричинило руйнування шестерні. Причинами виходу з ладу підшипникових вузлів, в даному випадку, можуть бути наступні: наслідок недостатнього змащення, забруднення, зносу або механічного пошкодження підшипника; низька якість комплектуючих; несвоєчасне або не професійне технічне обслуговування та помилки діагностування.

При клині підшипника шестерня зазнає різкого та значного механічного навантаження. Матеріал шестерні не витримує цього навантаження, що призводить до руйнування зубів. Наслідки руйнування привідної шестерні можуть призвести до наступних аварійних ситуацій:

1) Погіршення або вихід з ладу системи охолодження. Руйнування шестерні призводить до зупинки роботи помпи охолодження. Це, в свою чергу, може спричинити перегрів привідного двигуна автономної енергоустановки;

2) Пошкодження привідного двигуна внутрішнього згорання. Перегрів двигуна може призвести до серйозних пошкоджень, таких як деформація головки блока циліндрів, пошкодження поршнів, циліндрів, паливної апаратури і т.ін.

Пошкодження системи охолодження, як показує практика реальних експлуатацій, призводить до високовартісного ремонту, оскільки частковий, поточний чи капітальний ремонт або заміна привідного двигуна автономного генератора є дорогавартісною процедурою. Для запобігання виникнення ситуацій такого типу рекомендується виконувати наступні дії та операції:

1) Виконувати регулярне технічне обслуговування. Регулярне проведення технічного обслуговування генератора, включаючи перевірку стану помпи охолодження та підшипників зменшує ризик раптового виходу окремих деталей, вузлів та елементів конструкції.

2) Проведення регламентного технічного огляду стану підшипникових вузлів та системи їх змащення. При використанні підшипників закритого типу необхідно приділяти увагу стану поверхонь кочення та рівню мастила в них, яке не повинно перевищувати чи бути меншим 1/3 від загального об'єму підшипника.

3) Необхідно своєчасно проводити заміну зношених деталей, включаючи підшипники та шестерні. Також необхідно дотримуватись регламенту заміни деталей, вузлів та механізмів, що рекомендуються заводом-виробником обладнання, навіть у випадку відсутності візуальних пошкоджень та будь-яких ознак зносу чи дефекту. Як показує практика, вихід з ладу вживаних деталей може відбуватись раптово і призводити до значних матеріально-технічних витрат.

4) Використовувати якісні запасні частини. Це допоможе запобігти передчасному зносу та поломкам.

Проведений розширений аналіз надає більш детальне розуміння механічних несправностей автономних електромеханічних перетворювачів та підкреслює важливість регулярного технічного обслуговування та використання якісних компонентів для забезпечення їх надійної роботи.

Окремою частиною відомо автономних електромеханічних перетворювачів становлять різного типу та виду відмови електричної частини. Аналіз електричних несправностей автономних електромеханічних перетворювачів зображено на рис. 4.



Рисунок 4. Розподілення електричних відмов

До складу системи вироблення електроенергії автономних електромеханічних перетворювачів входять різні пристрої та системи. Основою такої системи є електрогенератор: в більшості випадків у вигляді синхронного явнopolусного генератора із електромагнітним збудженням. В науковій та технічній літературі електрогенератор також називається альтернатором. Що походить від слова "alternating", тобто змінний, змінний струм. Також використовуються і інші типи генераторів: подвійного живлення, із постійними магнітами, вентильні генератори і т.ін. По наявності рухомого контакту бувають як контактні (зі щітками та кільцями на роторі) так і безконтактні (без рухомого контакту). Очевидно, що кожен тип електрогенератора має свої переваги та недоліки, які в подальшому визначають їх експлуатаційну надійність та ремонтпридатність.

Іншими елементами електричної системи автономних електромеханічних установок є системи, що забезпечують регулювання вихідної напруги,

частотти та інших параметрів електрогенератора. Інша частина направлена на роботу системи привідного двигуна, власні потреби та системи автоматичного ввімкнення резерву (АВР).

В даній роботі проведено аналіз електричних несправностей автономних електромеханічних перетворювачів, з метою виявлення ключових факторів, що впливають на їх надійність та довговічність. До основних і самих розповсюджених несправностей відносяться:

1. Несправності системи AVR та альтернатора.

Ці несправності є найбільш поширеними і зумовлені переважно експлуатаційними факторами, а саме: критичним перевантаженням системи; перевищенням допустимих навантажень, що призводить до перегріву та виходу з ладу компонентів. Неправильним підключенням навантаження: помилки в підключенні, що спричиняють стрибки напруги та пошкодження електроніки. Недостатнє охолодження: погана вентиляція, що призводить до перегріву та зниження ефективності роботи.

Варто зазначити, що якість компонентів також відіграє важливу роль. Використання неякісних АВР та альтернаторів збільшує ризик виходу з ладу.

2. Несправності системи підігріву охолоджуючої рідини. Дані несправності є поширеними через тривалий режим роботи електричного тону при низьких температурах. Також постійна робота при низьких температурах призводить до швидкого зносу тону. Існують також і не критичні несправності: вихід з ладу тону не є критичним для роботи енергоустановки, особливо при високих температурах навколишнього середовища або при використанні не турбованого двигуна.

Важливо відмітити, що якість охолоджуючої рідини також впливає на ресурс електричного тону, системи охолодження та її складових, двигуна внутрішнього згорання в цілому. Це є фактор, що може призвести до раптового виходу установки з ладу та досить дороговартісного ремонту.

3. Несправності системи заряду акумуляторної батареї (АКБ). Система заряду АКБ включає генератор власних потреб, реле-регулятор заряду та власне саму АКБ. При наявності аномально високих чи екстремальних температур навколишнього середовища може відбутися вихід з ладу комплектуючих реле-регулятора заряду. При проведенні ревізій, технічного обслуговування чи планового технічного обслуговування необхідно регулярно перевіряти справність системи заряду АКБ.

Необхідно підкреслити, що якість самої АКБ, та правильність її обслуговування, значно впливає на роботу даної системи.

4. Несправності допоміжних електроприводів. Такі несправності стосуються виходу з ладу приводів керування паливною рейкою, глушіння, регулювання

карбюратора тощо. Тобто системи, що в тому числі відповідає за регулювання обертів при зміні навантаження (а отже і частоти), а отже і якості виробленої електроенергії. Несправності допоміжних електроприводів безпосередньо впливають на роботу енергоустановки, на її стабільність в статичних та динамічних режимах, економічність, ефективність та якість електроенергії. Використовуючи регулярне тестування (за рекомендаціями – кожного тижня) можливо забезпечити своєчасну заміну дефектних комплектуючих та безвідмовну роботу установки. Крім того, вібрація та рівень вологи, негативно впливають на роботу та ресурс даних вузлів.

5. Несправності контролера енергоустановки/регулятора обертів. Контролер енергоустановки/регулятор обертів є складним електронним пристроєм, що забезпечує захист, управління та моніторинг. У випадку виходу з ладу даних вузлів та їх компонентів, робота по ремонту та заміні повинна виконуватись висококваліфікованими фахівцями, що спеціалізуються по даним типам установок. Не дивлячись на те, що конструкція пристроїв контролера забезпечує стійкість до вібрації та впливу вологи, на практиці трапляються їх виходи з ладу $\approx 13\%$ випадків. Високий рівень захисту даного елемента забезпечується, в тому числі, за рахунок наявності компаундування всіх вузлів та елементів контролера. Однак, з іншого боку, це значно ускладнює поелементний ремонт таких вузлів.

Для зменшення ймовірності виходу з ладу дороговартісного контролера/регулятора обертів необхідно використовувати якісні електричні компоненти. Також, необхідно регулярно проводити перевірку електричних з'єднань, контактів та проводки.

Вихід з ладу альтернатора, є одним з найбільш дороговартісним випадком виходу з ладу автономних електромеханічних перетворювачів. Більше по вартості можливий лише капітальний ремонт привідного двигуна внутрішнього згорання. На рис. 5 приведено приклад електричної несправності альтернатора.

Дана несправність виникла через несиметрію навантаження, коли одна з фаз генератора була перевантажена, що призвело до перегріву інших фаз обмотки статора. У трифазних генераторах важливо рівномірно розподіляти навантаження між фазами, оскільки значна несиметрія навантаження по фазах призводить до локального перегріву окремих фаз обмоток.

При перевантаженні однієї фази через нерівномірний розподіл струму виникає надмірне нагрівання її обмотки, що призводить до деградації ізоляції, міжвиткових замикань та, зрештою, вигорання секції статора. При цьому інші фази можуть залишатися в нормальному робочому стані, що ускладнює своєчасне виявлення проблеми без

відповідних засобів контролю. Для запобігання подібним аварійним ситуаціям, необхідно:

- 1) Контролювати баланс навантаження між фазами за допомогою вимірювальних приладів.
- 2) Використовувати пристрої захисту, такі як реле асиметрії напруги або струму.
- 3) Регулярно перевіряти роботу генератора та розподіл навантаження в мережі.

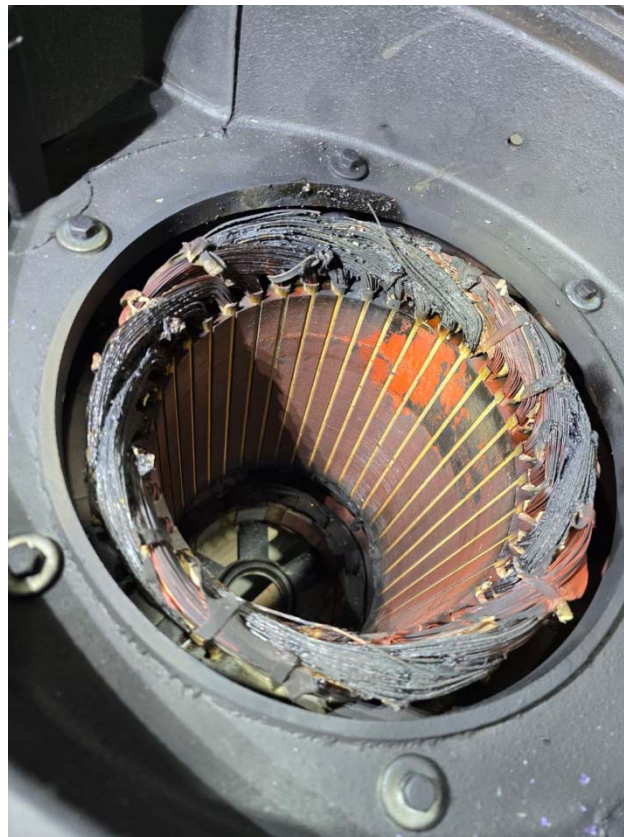


Рисунок 5. Зруйнована силова обмотка статора ДГУ

У цьому випадку необхідний капітальний ремонт статора – можливо, перемотка або заміна обгорілих секцій. Також слід проаналізувати схему електропостачання, щоб унеможливити подібні перевантаження в майбутньому.

V. ВИСНОВКИ

Аналіз статистики несправностей дизельних і бензинових генераторів показав, що електричні поломки становлять 51% випадків, а механічні – 49%. Це свідчить про приблизно рівномірний розподіл між двома категоріями несправностей, що вказує на необхідність комплексного підходу до обслуговування та діагностики. При використанні даних установок у військових цілях баланс поломок зміщується: механічні відмови: 75-85%, електричні відмови: 15-25%.

Серед електричних несправностей найбільш

поширеними є пошкодження обмоток статора через асиметрію навантаження, вихід з ладу регуляторів напруги, несправності акумуляторної системи та порушення ізоляції електропроводки. Виявлено, що асиметричне навантаження є однією з головних причин критичних відмов, оскільки перевантаження окремих фаз призводить до локального перегріву та руйнування ізоляції.

Механічні поломки найчастіше пов'язані зі зносом поршневої групи, недостатнім змащенням, перегрівом двигуна через несправності системи охолодження та порушеннями у роботі паливної системи. Важливим фактором, що впливає на знос механічних компонентів, є якість пального та регулярність технічного обслуговування.

Отримані результати підкреслюють необхідність впровадження систем моніторингу стану генераторів для раннього виявлення несправностей. Регулярна діагностика та контроль навантаження допоможуть запобігти критичним поломкам та збільшити термін служби обладнання. Зібрані статистичні дані можна використовувати для розробки ефективних профілактичних заходів, удосконалення інструкцій з технічного обслуговування та оптимізації режимів експлуатації генераторів. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на розробку алгоритмів автоматичного розподілу навантаження між фазами, вдосконалення систем захисту та підвищення надійності ізоляційних матеріалів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Головка В. М. Математичне моделювання автономної вітроелектричної установки з магнітоелектричним генератором / В. М. Головка, М. Я. Островерхов, М. А. Коваленко, І. Я. Коваленко, Д. В. Циценков // Науковий вісник Національного гірничого університету. – 2022. – № 5. – С. 74–79. – DOI: 10.33271/nvngu/2022-5/074.
- [2] Чумак В. Стабілізація напруги керованого автономного магнітоелектричного генератора з магнітним шунтом та збудженням від постійних магнітів / В. Чумак, В. Базенов, О. Тимошук, М. Коваленко, С. Цивінський, І. Коваленко, І. Ткачук // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2020. – № 6(5(114)). – С. 56–62. – ISSN 1729-3774.
- [3] Островерхов М. Розробка системи керування для зняття максимальної потужності автономної вітроустановки з синхронним магнітоелектричним генератором / М. Островерхов, В. Чумак, М. Коваленко, І. Коваленко // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2022. – № 4(2(118)). – С. 67–78. – DOI: 10.15587/1729-4061.2022.263432.
- [4] IEEE standard definitions for the measurement of electric power quantities under sinusoidal, nonsinusoidal, balanced, or unbalanced conditions // IEEE Std 1459-2010 (Revision of IEEE Std 1459-2000). – 2010. – P. 1–50.
- [5] Harris C. R. Array programming with NumPy / C. R. Harris, K. J. Millman, S. J. van der Walt, R. Gommers, P. Virtanen et al. // Nature. – 2020. – Vol. 585, № 7825. – P. 357–362. – URL: <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2649-2>.
- [6] Hunter J. D. Matplotlib: A 2d graphics environment / J. D. Hunter // Computing in Science & Engineering. – 2007. – Vol. 9, № 3. – P. 90–95.
- [7] Munoz-Galeano N. Instantaneous approach to IEEE std. 1459 power terms and quality indices / N. Munoz-Galeano, J. Alfonso-Gil, S. Orts-Grau, S. Seguí-Chilet, F. Gimeno-Sales // Electric Power Systems Research. – 2015. – Vol. 125. – P. 228–234.
- [8] Song-Manguelle J. A theoretical analysis of pulsating torque components in ac machines with variable frequency drives and dynamic mechanical loads / J. Song-Manguelle, G. Ekemb, D. Mon Nzongo, T. Jin, M. Doumbia // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2018. – Vol. 65. – P. 9311–9324.
- [9] Song-Manguelle J. Analytical expression of pulsating torque harmonics due to pwm drive / J. Song-Manguelle, G. Ekemb, S. Schroder, T. Geyer, J.-M. Nyobe-Yome, R. Wamkeue // 2016.
- [10] Чумак В. Порівняння синхронних генераторів для автономної бензинової установки / В. Чумак, М. Коваленко, І. Ткачук, І. Коваленко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – 2022. – № 2(8). – С. 32–38. – DOI: 10.20998/2079-3944.2022.2.06.
- [11] Song-Manguelle J. Pulsating torques in pwm multi-megawatt drives for torsional analysis of large shafts / J. Song-Manguelle, J.-M. Nyobe-Yome, G. Ekemb // Industry Applications, IEEE Transactions on. – 2010. – Vol. 46. – P. 130–138.
- [12] Makedonski N. Experimental Study of an Autonomous Power Supply System with a Special Type of Electric Drive / N. Makedonski, P. Parushev // 2023 IEEE Bulgaria Section Conference (BulEF). – 2023. – P. 1–6. – DOI: 10.1109/BulEF59783.2023.10406266.
- [13] Mingazeva K. A. Development of scientific foundations and method of autonomous power and gas supply of remote consumers from gas distribution networks / K. A. Mingazeva, R. Karimov, M. E. Dmitriev, T. R. Kuskildin, R. Tashbulatov, Ch. I. Nurmuhamedov // Petroleum Engineering. – 2024. – Vol. 22. – P. 294–303. – DOI: 10.17122/ngdelo-2024-4-294-303.
- [14] Serhiienko V. Development of autonomous energy supply of a mobile surface degassing plant / V.

Serhiienko // Journal of Electrical and Power Engineering. – 2023. – Vol. 28. – P. 47–52. – DOI: 10.31474/2074-2630-2023-1-47-52.

Science and Engineering. – 2019. – Vol. 643. – P. 012105. – DOI: 10.1088/1757-899X/643/1/012105.

Надійшла (Received) 27.02.2025

Прийнята (Accepted) 11.03.2025

Опублікована (Published) 30.04.2025

[15] Fedotov A. Utilization of electrochemical energy storage devices in autonomous power supply systems / A. Fedotov, R. Misbakhov, N. Chernova, K. Bakhteev // IOP Conference Series: Materials

OPERATION OF AUTONOMOUS ELECTROMECHANICAL CONVERTERS OF LOW AND MEDIUM POWER

- KOVALENKO M.A. PhD, Associate Professor Department of Electromechanics National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5602-2001>, e-mail: kovalenko_ma@i.ua;
- KOVALENKO I.Y. Senior lecturer of Renewable Energy Sources, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1097-2041>, e-mail: 2048141@ukr.net;
- TITOV Y.O. Postgraduate student, Department of Electromechanics National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-8222-7477>, e-mail: egor.shabadash@gmail.com;
- BAZAROV O.O. Postgraduate student, Department of Electrotechnical Devices and Electrotechnological Complexes National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-8491-2678>, e-mail: bazarov.oleh@gmail.com.

Purpose. To assess the reliability of operation of low and medium power electromechanical converters based on real experience in operating such systems.

Methodology. Statistical analysis methods, classical calculation methods for synchronous salient pole generators with electromagnetic excitation.

Findings. An analysis of failure statistics of autonomous electromechanical converters of small and medium power was carried out. The results obtained emphasize the need to implement generator condition monitoring systems for early detection of malfunctions. Regular diagnostics and load control will help prevent critical breakdowns and increase the service life of the equipment. The collected statistical data can be used to develop effective preventive measures, improve maintenance instructions and optimize generator operating modes. Further research can be aimed at developing algorithms for automatic load distribution between phases, improving protection systems and increasing the reliability of insulating materials. An analysis of the failure statistics of diesel and gasoline generators showed that electrical breakdowns account for 51% of cases, and mechanical ones - 49%. This indicates an approximately even distribution between the two categories of failures, which indicates the need for a comprehensive approach to maintenance and diagnostics. When using these installations for military purposes, the balance of failures shifts: mechanical failures: 75-85%, electrical failures: 15-25%. Among electrical failures, the most common are damage to the stator windings due to load asymmetry, failure of voltage regulators, malfunctions of the battery system and violations of the insulation of the electrical wiring. Mechanical failures are most often associated with wear of the piston group, insufficient lubrication, engine overheating due to malfunctions of the cooling system and malfunctions in the fuel system.

Originality. A detailed generalization of the experience of operating autonomous electromechanical converters in real conditions was carried out, which allowed us to establish the regularities of their operation, identify typical problems and develop recommendations for their elimination. The methods for assessing the efficiency of autonomous electromechanical converters proposed in the study can be used for further modernization of existing systems, as well as for creating new highly efficient autonomous power generating units.

Practical value. The results of the study have practical value for engineers, users and manufacturers of electromechanical equipment. The results obtained can be used to improve the efficiency and reliability of autonomous power systems operating in various conditions. In particular, it is possible to reduce maintenance costs, improve energy efficiency and extend the service life of the equipment. The results obtained can be used in the development of recommendations for the selection, modernization and diagnostics of autonomous electromechanical installations.

Keywords: autonomous electromechanical converters, power generating devices, operation, energy efficiency, reliability, maintenance, power supply, generator systems.

REFERENCES

- [1] Golovko, V. M., Ostroverkhov, M. Y., Kovalenko, M. A., Kovalenko, I. Y., & Tsyplenkov, D. V. (2022). Mathematical simulation of autonomous wind electric installation with magnetoelectric generator. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (5), 74–79. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-5/074>
- [2] Chumack, V., Bazenov, V., Tymoshchuk, O., Kovalenko, M., Tsyvinskyi, S., Kovalenko, I., & Tkachuk, I. (n.d.). Voltage stabilization of a controlled autonomous magnetoelectric generator with a magnetic shunt and permanent magnet excitation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(5 (114)), 56–62.
- [3] Ostroverkhov, M., Chumack, V., Kovalenko, M., & Kovalenko, I. (2022). Development of the control system for taking off the maximum power of an autonomous wind plant with a synchronous magnetoelectric generator. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(2(118)), 67–78. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.263432>
- [4] IEEE. (2010). IEEE standard definitions for the measurement of electric power quantities under sinusoidal, nonsinusoidal, balanced, or unbalanced conditions (IEEE Std 1459-2010). IEEE.
- [5] Harris, C. R., Millman, K. J., van der Walt, S. J., Gommers, R., Virtanen, P., Bastien, T., ... & Oliphant, T. E. (2020). Array programming with NumPy. *Nature*, 585(7825), 357–362. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2649-2>
- [6] Hunter, J. D. (2007). Matplotlib: A 2d graphics environment. *Computing in Science & Engineering*, 9(3), 90–95.
- [7] Munoz-Galeano, N., Alfonso-Gil, J., Orts-Grau, S., Seguí-Chilet, S., & Gimeno-Sales, F. (2015). Instantaneous approach to IEEE std. 1459 power terms and quality indices. *Electric Power Systems Research*, 125, 228–234.
- [8] Song-Manguelle, J., Ekemb, G., Mon Nzongo, D., Jin, T., & Doumbia, M. (2018). A theoretical analysis of pulsating torque components in ac machines with variable frequency drives and dynamic mechanical loads. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65, 9311–9324.
- [9] Song-Manguelle, J., Ekemb, G., Schroder, S., Geyer, T., Nyobe-Yome, J.-M., & Wamkeue, R. (2016). Analytical expression of pulsating torque harmonics due to pwm drive. (Журнал или конференция не указаны, пожалуйста, предоставьте эту информацию).
- [10] Chumak, V., Kovalenko, M., Tkachuk, I., & Kovalenko, I. (2022). Porivniannia synkhronnykh heneratoriv dlia avtonomnoi benzynovoi ustanovky. *Visnyk NTU «KhPI». Serii: Problemy udoskonalennia elekt-rychnykh mashyn I aparativ. Teoriia I praktyka*, (2 (8)), 32–38. <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2022.2.06>
- [11] Song-Manguelle, J., Nyobe-Yome, J.-M., & Ekemb, G. (2010). Pulsating torques in pwm multi-megawatt drives for torsional analysis of large shafts. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 46, 130–138.
- [12] Makedonski, N., & Parushev, P. (2023). Experimental Study of an Autonomous Power Supply System with a Special Type of Electric Drive. 1-6. <https://doi.org/10.1109/BulEF59783.2023.10406266>
- [13] Mingazeva, K. A., Karimov, R., Dmitriev, M. E., Kuskildin, T. R., Tashbulatov, R., & Nurmuhamedov, C. I. (2024). Development of scientific foundations and method of autonomous power and gas supply of remote consumers from gas distribution networks. *Petroleum Engineering*, 22, 294-303. <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2024-4-294-303>
- [14] Serhiienko, V. (2023). Development of autonomous energy supply of a mobile surface degassing plant. *Journal of Electrical and Power Engineering*, 28, 47-52. <https://doi.org/10.31474/2074-2630-2023-1-47-52>
- [15] Fedotov, A., Misbakhov, R., Chernova, N., & Bakhteev, K. (2019). Utilization of electrochemical energy storage devices in autonomous power supply systems. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 643, 012105. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/643/1/012105>

FEATURES OF MINIMIZING TOTAL ELECTRICAL LOSSES IN HIGH-VOLTAGE ELECTROMECHANICAL SYSTEMS FOR STATIONARY INDUSTRIAL FAN INSTALLATIONS

SYNETSKYI A.V. postgraduate student of the Department of Electrical Machines, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: xibi-tur@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-1859-4171>;

KOTSUR I.M. Ph.D in Engineering, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electrical Machines, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: igor.m.kotsur@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6394-7849>;

Purpose. Conduct a study of commutation processes and develop a methodology for determining the switching frequency of semiconductor elements in the converter for high-voltage electromechanical systems to minimize electrical losses during their operation with fan loads.

Methodology. Methods of multi-criteria and single-criteria optimization for finding the optimal values of electrical losses in an electromechanical system, methods for solving first-order differential equation systems, and analytical methods.

Findings. To improve the energy efficiency of a high-voltage electromechanical system for stationary industrial fan installations without modifying their structural design, the level of total losses has been assessed. A target function has been constructed to represent the dependence of total losses in the electric drive on the switching frequency of power switches and the harmonic distortion coefficients of the stator and rotor currents in a high-voltage wound-rotor asynchronous motor. Through approximation, a generating dependence of the switching frequency of the converter's power switches on the harmonic distortion coefficient of the stator and rotor currents of the asynchronous motor has been established. The target function, initially dependent on three variables, has been transformed into a function of a single variable. Simulation modeling of electromagnetic and energy processes in the high-voltage electromechanical system has been conducted to evaluate total loss levels. A comparative analysis has been performed, confirming the adequacy of the obtained analytical expression for determining the optimal switching frequency of the converter's power elements under the condition of minimizing losses in the high-voltage electromechanical system, with results validated through simulation.

Originality. A study of commutation processes in the power elements of the converter, which is part of the high-voltage electromechanical system, has been conducted. More precise analytical dependencies have been obtained, allowing for the determination of the main and commutation losses in the power elements of the converter for the high-voltage electromechanical system.

Practical value. A methodology for determining the optimal switching frequency of the semiconductor elements in the converter, which is part of the high-voltage electromechanical system, has been proposed. The calculation error of the optimal switching frequency of the semiconductor elements, obtained analytically, does not exceed 3.5% compared to the results obtained through simulation. The proposed methodology can be applied to minimizing losses in high-voltage electromechanical drive systems for both AC and DC applications used in various industrial mechanisms.

Keywords: switching frequency, optimization, losses, energy efficiency, converter, high-voltage electromechanical system.

I. INTRODUCTION

Ventilation of mines using main ventilation fans (MVF) is one of the most energy-intensive technological processes. Almost all mines use non-regulated electric drive systems for MVF [1]. To improve the efficiency of many MVF systems, it is possible to transition to a lower rotor speed by implementing energy-efficient electric drive control systems, such as frequency converters (FC), inductive-capacitive converters (ICC), and converters based on the asynchronous-thyristor cascade (ATC) scheme. These systems allow independent control of the

speed and torque of both asynchronous and synchronous motors [2]-[4].

However, FCs and ICCs have high installed power, comparable to the power of the MVF motor. In addition, their application is limited in high-voltage MVF electric drives due to the voltage class of the converter's semiconductor elements. Therefore, speed regulation remains feasible on the rotor side of the motor, where the rotor voltage is significantly lower than the stator voltage. For this purpose, an ATC can be used, and such an electric drive system must ensure a high level of energy

efficiency.

It is known that increasing the switching frequency of power switches reduces the content of higher harmonics in the stator and rotor currents of an induction motor (IM), thereby decreasing AM losses. However, a higher switching frequency also increases both fundamental and commutation losses in the converter's power switches. Consequently, it is necessary to determine the optimal switching frequency for power switches in this type of electric drive system [5].

II. ANALYSIS OF LAST RESEARCHES

The analysis of studies [6]-[8] has shown that the development of contactless control systems for induction motors has led to reduced capital costs for equipment and increased energy efficiency in industrial mechanisms. The implementation of existing control systems enables smooth regulation of drive motors, maintaining constant torque in the sub-synchronous speed range while keeping the efficiency and power factor of the electric drive at a high level [8].

However, for such electric drive systems, the issue of determining the optimal switching frequency of power switches that ensures minimal losses in the motor-converter system has not been investigated [9], [10]. A comparative analysis has shown that the most energy-efficient control system, particularly for high-voltage electric drives, is the frequency-current asynchronous-thyristor cascade [11], [12].

According to [8], the frequency-current asynchronous-thyristor cascade combines the advantages of classical pulse regulation systems and asynchronous-thyristor cascades. A distinctive feature of this system is the presence of a pulse regulator in the rectified rotor current circuit, represented as a step-up voltage pulse converter (SUPC). The presence of a capacitor (C) ensures a specified level of overvoltage in the rotor winding, caused by the frequent switching of the key (K). The diode (VD) prevents the reverse current flow from the capacitor when the switch is closed.

When the switch is opened, the stored energy in the rotor winding, along with part of the slip energy (depending on the ratio of rotor EMF to inverter EMF), is recovered into the network at a constant inverter commutation angle in the low-power inverter. This minimizes the consumption of reactive power from the network and increases the power factor of the drive across the entire rotor speed range [5]-[8].

Thus, to improve the energy efficiency of the electric drive system, using the example of the frequency-current asynchronous-thyristor cascade, without altering the structural features of the circuit, it is necessary to evaluate the total loss level in the motor-converter system. A target function needs to be constructed to represent the dependence of total losses in the electric drive on the switching frequency of the power switches and the harmonic distortion coefficients of the stator and rotor

currents in the asynchronous motor [11]- [12]. Using approximation, the generating dependence of the switching frequency of the converter's power switches on the harmonic distortion coefficient of the stator and rotor currents in the drive motor should be established. The target function, initially dependent on three variables, must be reduced to a function of a single variable. Simulation modeling of the electromagnetic and energy processes in the considered electric drive system should be conducted to assess the total loss level. A comparative analysis should be performed to determine the adequacy of the obtained analytical expression for determining the optimal switching frequency of the converter's power elements, ensuring minimal losses in the electric drive, with the results obtained through simulation.

III. FORMULATION OF THE WORK PURPOSE

Conduct a study of commutation processes and develop a methodology for determining the switching frequency of semiconductor elements in the converter for high-voltage electromechanical systems to minimize electrical losses during their operation with fan loads.

IV. EXPOUNDING THE MAIN MATERIAL AND RESULTS ANALYSIS

To determine the optimal switching frequency of the power switches in the converter based on the frequency-current asynchronous-thyristor cascade scheme, it is advisable to evaluate the amount of constant and variable losses in the induction motor (IM). As the switching frequency of the keys increases, these losses decrease relative to the growing fundamental and commutation losses in the converter's power switches.

The total losses in the IM, according to [13], can be determined using the following expression:

$$\Delta P = \frac{P_{rated} \cdot (1 - \eta)}{\eta}, \quad (1)$$

where: P_{rated} is the rated power of the induction motor; η is the efficiency coefficient of the induction motor.

The constant losses, considering the presence of higher harmonics in the stator and rotor currents, can be determined with sufficient accuracy using the following relation [14]:

$$P_{const} = \lambda_I \cdot \Delta P - M_{rated} \cdot \omega \cdot s_{rated} \cdot \left(I + \frac{r_1}{r_2} \right), \quad (2)$$

$$\lambda_I = \frac{I_1}{\sqrt{\sum_{k=2}^n I_k^2}}, \quad (3)$$

where λ_I is a coefficient that accounts for harmonic distortions in the current; s_{rated} is the nominal slip of the rotor of the asynchronous motor; M_{rated} is the nominal

torque of the motor; I_k is the amplitude of the n-th harmonic of the current.

The variable losses in the stator and rotor windings of an induction motor can be determined using the following expression [15]:

$$P_{el} = 3 \cdot I_s^2 \cdot \lambda_{Is}^2 \cdot r_1 + 3 \cdot I_r^2 \cdot \lambda_{Ir}^2 \cdot r_2 \quad (4)$$

The additional and ventilation losses in high-voltage asynchronous motors typically do not exceed 2% [15] and will increase or decrease proportionally with the change in the switching frequency of the key. Therefore, these losses can be neglected.

Thus, the target function for total losses in the induction motor as a function of the current distortion coefficient can be written as:

$$\begin{aligned} \Delta P_{IM}(\lambda_{Is}, \lambda_{Ir}) = & 3 \cdot I_s^2 \cdot \lambda_{Is}^2 \cdot r_1 + 3 \cdot I_r^2 \cdot \lambda_{Ir}^2 \cdot r_2 + \dots \\ & \dots + \lambda_{Is} \cdot \Delta P - M_{rated} \cdot \omega \cdot s_{rated} \cdot \left(I + \frac{r_1}{r_2} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

Let's consider the losses occurring in the DC circuit of the converter during periodic commutations of the valves, specifically in the power switch, the blocking diode, as well as in the rectifying-inverting groups.

The total losses in the power transistor have several components:

$$P_{tr} = P_{main} + P_{on} + P_{off} + P_{lc} + P_{cc} \quad (6)$$

where P_{main} are the main losses created by the collector current in the on state of the transistor; P_{on} are losses when the transistor is turned on; P_{off} are losses when the transistor is turned off; P_{lc} are losses from leakage currents; P_{cc} are losses in the control circuit.

In most cases, losses from leakage currents and in the control circuit can be neglected.

Calculation of losses in the on state of IGBT type transistor can be done in the same way as it is done for thyristor (volt-ampere characteristics of devices in the on state are similar) [15]:

$$P_{main} = U_o \cdot I_a \left(I + k_f^2 \frac{I_a R_d}{U_o} \right), \quad (7)$$

where U_o , R_d are threshold voltage and dynamic resistance, respectively; $I_a = I_{c_av}$ is the average value of the collector current of the power key; k_f is the coefficient of the collector current shape.

The parameters of the volt-ampere characteristic of the IGBT in the on state can be determined from the corresponding characteristics given in the IGBT data sheet [13].

The average value of collector current I_{c_av} is determined by the ratio:

$$I_{c_av} = I_{in} \cdot \gamma, \quad (8)$$

where I_{in} is the average value of the input current of the converters; $\gamma = \frac{t_i}{T}$ is fill factor, equal to the ratio of the duration of the on state of the transistor to the repetition period.

Since the input current of the converter can have significant ripple, the curves of the collector current of the transistor and the anode current of the diode can have a rather complex shape. To calculate the effective value of the collector current, it is possible to make an assumption about the linear law of change of this current on the interval of the on state of the power switch. In this case, the rate of increase of the input current is equal to:

$$\frac{di}{dt} = \frac{U_{in}}{L_l}, \quad (9)$$

where L_l is the inductance of the windings of the induction motor.

For calculating the losses in the transistor during turn-on, as shown in [15], it is convenient to assume a linear law for the collector voltage drop during the turn-on interval:

$$u_k = U_{kmax} \left(1 - \frac{t}{t_{cn}} \right) \approx U_{out} \left(1 - \frac{t}{t_r} \right), \quad (10)$$

where u_k is instantaneous value of collector voltage; $U_{kmax} = U_{out}$ is collector voltage before switching on; $t_{cn} = t_r$ is duration of collector voltage decay, approximately equal to the duration of collector current rise when the transistor is turned on.

Equation (8) is valid assuming for $0 \leq t \leq t_{cn}$ that the beginning of time counting coincides with the beginning of collector voltage decay.

As the collector voltage decreases and the collector current increases, the voltage drop in the rotor winding of the induction motor increases, and accordingly, the current through the diode decreases. Since the stator and rotor windings have inductance L_l , the collector current during transistor turn-on increases according to a quadratic law:

$$i_k = \frac{U_{kmax}}{2 \cdot L_l} \cdot \frac{t^2}{t_r} = \frac{U_{out}}{2 \cdot L_l} \cdot t_{cn} \cdot \frac{t^2}{t_r^2}. \quad (11)$$

Let us introduce the value of I_{kp} , defined by the ratio:

$$I_{kp} = \frac{U_{out}}{2 \cdot L_l} \cdot t_r \cdot (12)$$

The value of collector current, by (11) is the value of collector current at the moment of voltage drop between collector and emitter to zero. This current value is used as a design value in the equation for calculating turn-on losses [15]:

$$P_{on} = \frac{1}{T} \int_0^{t_{cn}} u_k i_k dt = \frac{1}{12} U_{out} I_{kp} \frac{t_r}{T}.$$

If we assume that $I_{kp} = I_{in}$, then the equation with regard to (12) can be rewritten in the form:

$$P_{on} = \frac{1}{12} U_{out} I_{in} \frac{t_r}{T} = \frac{1}{12} U_{out} \cdot I_{in} \cdot t_r \cdot f_k, \quad (13)$$

Similar considerations can be used to calculate the losses in the transistor at turn-off. In this case, it is convenient to assume a linear law of collector current decay:

$$i_k = I_{kmax} \left(1 - \frac{t}{t_f}\right) \approx I_{in} \left(1 - \frac{t}{t_f}\right), \quad (14)$$

where t_f is the duration of collector current drop at turn-off.

Similar can be made about the linear law of collector voltage rise by a quadratic law on the off interval:

$$u_k = u_{cs} = \frac{I_{in}}{2 \cdot C_s} \cdot \frac{t^2}{t_f} = \frac{I_{in} \cdot t_f}{2 \cdot C_s} \cdot \frac{t^2}{t_f^2}, \quad (15)$$

$$C_s = \frac{I_{in} \cdot t_f}{2 \cdot U_{out}}.$$

where C_s is the capacitance of the thyristor protection circuit capacitor.

Accordingly, the losses when the transistor is turned off are determined by the ratio:

$$\begin{aligned} P_{off} &= \frac{1}{T} \int_0^{t_f} u_k i_k dt = \frac{1}{12} \cdot U_{out} I_{in} \frac{t_f}{T} = \\ &= U_{out} I_{in} \frac{t_f}{T} = \frac{1}{12} U_{out} I_{in} \cdot t_f \cdot f_k. \end{aligned} \quad (16)$$

Losses in the diode from reverse current VD, according to [8], have also several components, the most significant of which are losses from direct current (main) and losses at diode switching off. The forward current losses can be calculated using expression (7).

According to [13], [15] the diode turn-off loss powers can be determined from the following expression:

$$P_{off} = \frac{I_{bm} \cdot U_{bm}}{T_k} \cdot \frac{\tau}{2} = \frac{1}{2} I_{bm} U_{bm} \tau f_k, \quad (17)$$

where I_{bm}, U_{bm} is amplitude of reverse current and voltage, respectively; T_k is period of switching frequency; f_k is switching frequency; τ is duration of the diode reverse current decay, the value of which is determined from [15].

Thus, the total losses in the limiting diode:

$$\begin{aligned} P_{vd} &= U_o \cdot I_d \left(1 + k_f^2 \frac{I_d R_\theta}{U_o}\right) + \frac{I_{bm} \cdot U_{bm}}{T_k} \cdot \left(\frac{\tau_{ib}^2}{\tau_{ib} + \tau_{ub}}\right) + \dots \\ &\dots + \frac{1}{2} I_{bm} U_{bm} \tau_{ib} f_k \end{aligned} \quad (18)$$

Losses in the rectifier-inverter group can be determined quite accurately as in the power transistor (diode) according to expression (6). Also, as in the case of the transistor, losses from leakage currents and in the control circuit can be neglected. In this case we can also neglect the losses during switching on and off of the thyristor (diode). Thus, the total losses in the thyristor of the rectifier will correspond to the main losses:

$$P_t = P_{main} = U_o I_{av} \left(1 + k_f^2 \frac{I_{av} R_t}{U_o}\right), \quad (19)$$

where U_o, R_t are threshold voltage and dynamic resistance of thyristor (diode), respectively; I_{av} is the average value of anode current of thyristor (diode); k_f is thyristor (diode) current waveform coefficient.

Average value of the thyristor anode current for a three-phase bridge circuit:

$$I_{av} = \frac{I_d}{3}, \quad (20)$$

The total rectifier losses will be determined by the number of valve arms in the circuit:

$$P_{rect} = n \cdot P_{main}. \quad (21)$$

For the three-phase bridge circuit $n = 6$.

According to equations (6), (18) and (21), we can finally write the function on the switching frequency of all losses in the converters in the following form:

$$\begin{aligned} P_{\Sigma conv}(f_k) &= U_o \cdot I_a \left(1 + k_f^2 \frac{I_a R_t}{U_o}\right) + \dots \\ &\dots + \frac{1}{12} U_{out} \cdot I_{in} \cdot t_r \cdot f_k + \frac{1}{12} U_{out} I_{in} \cdot t_f \cdot f_k + \dots \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \dots + U_o \cdot I_d \left(1 + k_f^2 \frac{I_d R_t}{U_o} \right) + \frac{I_{bm} \cdot U_{bm}}{T_k} \cdot \left(\frac{\tau_{ib}}{2} \right) + \dots \\
& \dots + \frac{1}{2} I_{bm} U_{bm} \tau_{ib} f_k + 6 \cdot U_o I_{av} \left(1 + k_f^2 \frac{I_{av} R_t}{U_o} \right) + \dots \\
& \dots + 6 \cdot U_o I_{inv} \left(1 + k_f^2 \frac{I_{inv} R_t}{U_o} \right) \quad (22)
\end{aligned}$$

Using expressions (5) and (22), the overall loss function of the electromechanical system can be expressed:

$$P_{\Sigma sys}(f_k, \lambda_{Is}, \lambda_{Ir}) = P_{\Sigma conv}(f_k) + P_{motor}(\lambda_{Is}, \lambda_{Ir}) \quad (23)$$

It follows from (23) that to determine the optimal switching frequency of the power switch it is necessary to set the optimization problem for three variables: the distortion coefficients of the stator currents λ_{Is} , rotor currents λ_{Ir} , and from the switching frequency of the switch f_k . The solution of the problem is rather complex and cumbersome and requires the determination of the coefficients λ_{Is} , and λ_{Ir} , depending on the switching frequency of the switch f_k . Therefore, it is necessary to reduce the target function to the form from one variable, i.e. from f_k .

Fig. 1 shows the dependences of harmonic distortion coefficients for the stator and rotor currents of AK-4 type induction motor of 1000 kW power on the switching frequency of the converter switch elements, obtained by simulation modelling when the electromechanical system is operated with a fan load in the range of operating slip $s = 0,5 \div 0,1$.

During modelling and calculation of all losses in the converter we used power elements for bridge rectifier diodes of W1074Y#320 series, reverse current diode of M0768S/RX250 series, IGBT transistor of T0850VB25E series and inverter group thyristors of N0606YS250 series of Westcode manufacturer, the passport data of which are given in [16]. It is also possible to determine the harmonic distortion coefficients in practice in the process of converter adjustment, using modern measuring instruments that can perform spectral analysis of currents or voltages, and independently calculate the harmonic distortion coefficient.

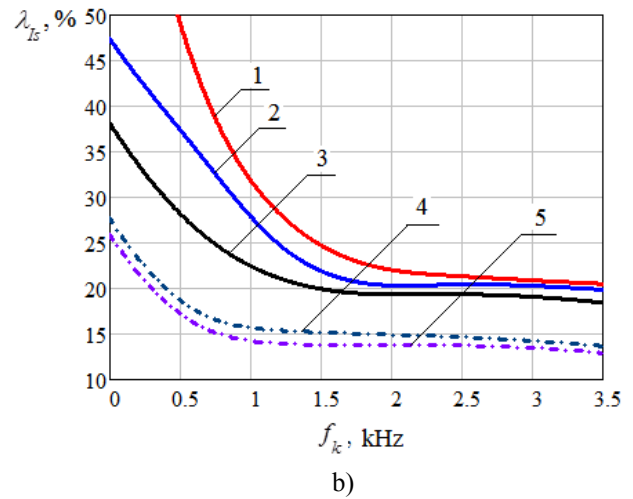
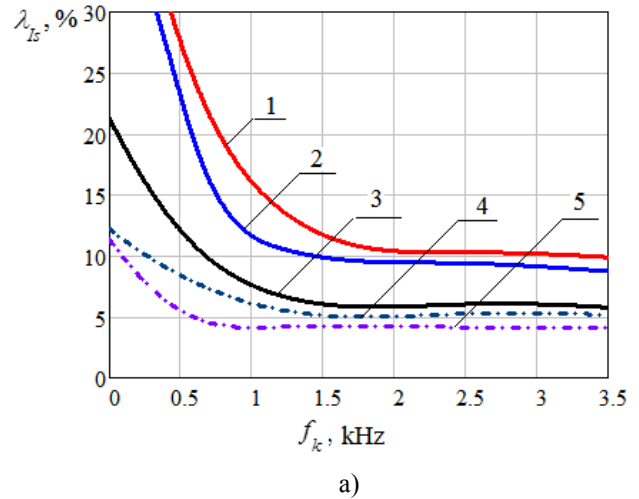


Figure 1. Dependences of stator (a) and rotor (b) current harmonic distortion coefficients of AK-4 type induction motor with power of 1000 kW on the frequency of commutation of the converter switching elements: 1 - $s=0,5$; 2 - $s=0,4$; 3 - $s=0,3$; 4 - $s=0,2$; 5 - $s=0,1$.

The equation describing the dependence of the harmonic distortion coefficient on the switching frequency for the stator current of the induction motor is as follows:

$$\begin{aligned}
\lambda_{Is}(f_k) = & 0,529 - 0,701 \cdot f_k + 0,445 \cdot f_k^2 - \dots \\
& \dots - 0,126 \cdot f_k^3 + 0,013 \cdot f_k^4 \quad (24)
\end{aligned}$$

and for rotor current of the induction motor:

$$\begin{aligned}
\lambda_{Ir}(f_k) = & 0,857 - 0,999 \cdot f_k + 0,614 \cdot f_k^2 - \dots \\
& \dots - 0,172 \cdot f_k^3 + 0,018 \cdot f_k^4 \quad (25)
\end{aligned}$$

Dependence (23), taking into account (24) and (25), can be reduced to the form from one variable. Consequently, to determine the optimal switching

frequency of the switching elements of converter at which the minimization of losses in the electromechanical system is performed, it is necessary to reduce the target function to the form:

$$\frac{d}{df_k} P_{\Sigma}(f_k) = 0.$$

The final expression for determining the optimal switching frequency is as follows:

$$\begin{aligned} & \left(1,35 \cdot 10^{-3} \cdot I_s^2 \cdot r_1 + 2,6 \cdot 10^{-3} \cdot I_r^2 \cdot r_2\right) \cdot f_k^7 - \dots \\ & \dots - \left(22,94^{-3} \cdot I_s^2 \cdot r_1 + 43,34 \cdot 10^{-3} \cdot I_r^2 \cdot r_2\right) \cdot f_k^6 + \dots \\ & \dots + \left(0,165 \cdot I_s^2 \cdot r_1 + 0,31 \cdot I_r^2 \cdot r_2\right) \cdot f_k^5 - \dots \\ & \dots - \left(0,652 \cdot I_s^2 \cdot r_1 + 1,236 \cdot I_r^2 \cdot r_2\right) \cdot f_k^4 + \dots \\ & \dots + \left(1,554 \cdot I_s^2 \cdot r_1 + 3,006 \cdot I_r^2 \cdot r_2\right) \cdot f_k^3 - \dots \\ & \dots - \left(2,271 \cdot I_s^2 \cdot r_1 + 4,565 \cdot I_r^2 \cdot r_2\right) \cdot f_k^2 + \dots \\ & \dots + \left(1,924 \cdot I_s^2 \cdot r_1 + 4,101 \cdot I_r^2 \cdot r_2\right) \cdot f_k - \dots \\ & \dots - \left(0,742 \cdot I_s^2 \cdot r_1 + 1,712 \cdot I_r^2 \cdot r_2\right) + \Delta P + \dots \\ & \dots + \frac{1}{12} U_{out} \cdot I_{in} \cdot t_r + \frac{1}{12} U_{out} I_{in} \cdot t_f + \dots \\ & \dots + \frac{1}{2} I_{bm} U_{bm} \tau_{ib} = 0 \end{aligned} \quad (26)$$

Expression (26) is not difficult to solve with the help of mathematical packages.

For AK-4 type of induction motor with rated power of 630 kW, working with fan character of load on working slip $s=0,5$, has power on shaft $P_{s=0,5}=204$ kW, stator current $I_{s_{s=0,5}}=118$ A; stator winding resistance $r_1=0,295$ Ohm; rotor current $I_r=192$ A; rotor winding resistance $r_2=0,028$ Ohm, according to (26) the optimum value of switching frequency of switching elements of converter under condition of minimisation of losses in electromechanical system $f_k^{opt}=0,626$ kHz is obtained.

Thus, the obtained analytical expression (26) can be used in determining the effective switching frequency of power switches of the converters, which provides the minimum level of losses in the electromechanical system. To calculate the effective switching frequency for other values of operating slip and other power of induction motor, it is necessary to give approximating expressions (24) and (25) for eigenvalues of harmonic distortion coefficients of induction motor stator and rotor currents.

To confirm the adequacy of the above method of determining the effective switching frequency of the converter switchers, according to [8], a simulation model was developed, which includes a block of electromagnetic submodel, taking into account the nonlinearities of the induction motor [11], and the block of calculating the energy performance of the drive.

Fig. 2 shows the calculated dependences of total losses in the electromechanical system on the frequency of commutation of the converter switchers, respectively, for AK-4 type induction motors with rated power $P_{rated}=630$ kW, $P_{rated}=800$ kW, $P_{rated}=1000$ kW at operating slip $s=0,5$, obtained by simulation modeling.

The analysis of dependencies shows that minimization of total losses in the electromechanical system is performed at switching frequencies for induction motor: $P_{rated}=630$ kW - $f_k=0,643$ kHz; for $P_{rated}=800$ kW - $f_k=0,698$ kHz; for $P_{rated}=1000$ kW - $f_k=0,704$ kHz. It should be noted, that for induction motor with different rated powers in the electromechanical system, the optimal value of the switching frequency practically does not change.

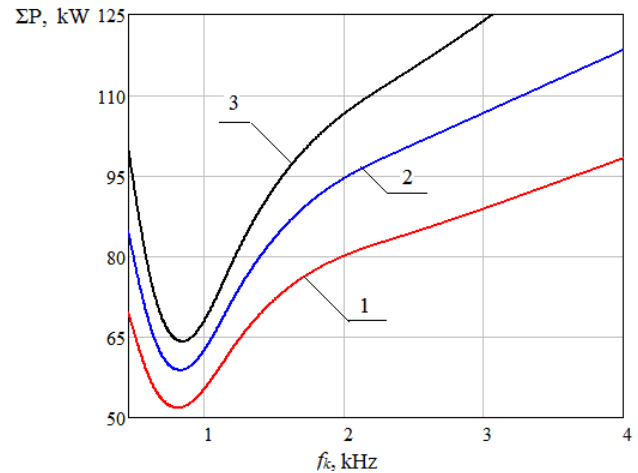


Figure 2. Calculated dependences of the total losses in the electromechanical system on the switching frequency for the operating slip of induction motor $s=0,5$: 1 - at $P_{rated}=630$ kW; 2 - at $P_{rated}=800$ kW; 3 - at $P_{rated}=1000$ kW.

As a result of the conducted research, the method of determining the optimal switching frequency of the converter power switchers is proposed, which consists in the formation of the target function of the dependence of the total losses in the electromechanical system on the switching frequency of the converter power switchers. For induction motor with $P_{rated}=630$ kW the optimal switching frequency calculated by means of analytical expression is $f_k^{opt}=0,626$ kHz, by means of simulation modeling - $f_k=0,621$ kHz. Thus, the calculation error

does not exceed 3.5%.

The obtained analytical expression (26) has an acceptable error in determining the effective switching frequency of the power switchers, which provides the minimum level of losses in the electromechanical system. However, the proposed method requires the determination of harmonic distortion coefficients for the stator and rotor currents of the induction motor, the values of which depend both on its operating slip and on the operating mode of the electromechanical system. Therefore, for each case it is necessary to give approximating expressions (24) and (25) for the eigenvalues of harmonic distortion coefficients of the induction motor stator and rotor currents. The proposed methodology for determining the optimal switching frequency of the power switch can be applied in engineering design, as well as in the adjustment work of converters depending on the class and mode of operation of the electromechanical system.

V. CONCLUSION

Investigations of switching processes in power elements of the converter are carried out. More accurate expressions allowing to estimate the main and switching losses in power elements of the converter have been obtained.

The method of determination of the optimum frequency of switching of the power switchers on the example of the converter is offered. The calculation error of the optimum switching frequency of the power switchers of the converter, which is obtained by the analytical method in comparison with the results obtained by means of modeling, does not exceed 3.5%.

The proposed methodology for determining the optimal switching frequency of the converter power switchers can be used in the problems of minimizing losses in AC and DC electromechanical systems, which are used in different areas of intermediate mechanisms.

REFERENCE

- [1] Antoshchenko N. I., Kalyuzhny V. V., Kotikov V. P., Tynda G. B., Andrienko P. D., Sadovoy A. V. (2014). New approach to regulation of ventilation of coal. *Coal of Ukraine*, 3, 29-32.
- [2] Pereverzev, A.V. (2004). Characteristics of step-up converters for uninterruptible power supply systems, *Tekhnichna Elektrodinamika*, 239.
- [3] Shaviolkin O.V. (2015). Power semiconductor energy converters, *KhNUM University named after OHM. Beketova*, 403.
- [4] Cheung, K., Cheung S. (2002). Large-Scale Energy Storage Systems, *Imperial College London*, 4 (12), 45 – 48.
- [5] Joao, L.A. (2005). P-Q theory power components calculations, *IEEE: International symposium on industrial electronics*, 6, 25-27.
- [6] Andrienko P.D., Kotsur M. I., Kotsur I.M. (2011) Patent of Ukraine 64126, Int. Cl.³ H02P 27/05(2006.01) Prystryi impulsnogo keruvannya procesamy peretvorenniya energii v asinkhronnomu dvyguni z faznym rotorom. [Device for impulse control by energy conversion processes in wound-rotor induction motor] published 25.10.2011, *Bulletin №20*,
- [7] Kotsur M. I., Andrienko P. D., Kotsur I. M. (2012). Osobennosti rezhimov raboty modifitsirovannoy sistemy impulsnogo regulirovaniya [Operation modes features of modificate pulse control system of asynchronous motor with phase rotor], *Elektromechanichni ta enegrozberigayuchi sistemy*, 19, 3, 163-165.
- [8] Synetskyi, A., & Kotsur, I. (2024). Determination of converter parameters for high-voltage electromechanical systems of stationary installations of industrial fans. *Electrical Engineering and Power Engineering*, (3), 7–15. <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2024-3-1>
- [9] Tunyasrirut S. (2008). DSP based modified slip energy recovery drive using a 12-pulse converter and shunt chopper for speed control system of a wound rotor induction motor, *Electric Power System Research*, 6, 861-872.
- [10] Kumar, A., Aggarwal S. K., Saini L. M. (2011). Performance analysis of a microcontroller based slip power recovery drive, *International Journal of Engineering, Science and Technology*, 3, 25 – 35.
- [11] Sivanagappa, V.J., Sarumathi M., Sivaranjani R., Soniya N., Sujeetha A. (2014). Slip Ring Induction Motor Power Factor Control Using Fuzzy Logic Controller, *International Journal of P2P Network Trends and Technology (IJPTT)*, 4, 40-46.
- [12] Hilmi, A. (2006). High chopper frequency drive of wound rotor induction motor with a resistively loaded rotor chopper, *IEEE: Transactions on Industrial Electronics*, 8, 100–108.
- [13] Tunyasrirut, S. (2008). DSP based modified slip energy recovery drive using a 12-pulse converter and shunt chopper for speed control system of a wound rotor induction motor, *IEEE: Electric Power System Research*, 6, 861–872.
- [14] Ping, J., Bingshu W., Junwei Z. (2009). Simulation of a new method in double closed loop for slip power recovery motor with chopper proceedings, *IEEE: Trans. on Power Electronics*, 6, 6. – 66.
- [15] Dubey, G.K. (2008). Power semiconductor controlled drives, PHI. Edition, London, 440p.
- [16] WESTCODE. Katalog produkciji. URL: <http://www.westcode.com/products.html>.

Received 18.02.2025;

Accepted 05.03.2025;

Published 30.04.2025;

ОСОБЛИВОСТІ МІНІМІЗАЦІЯ СУМАРНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ ВТРАТ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ ДЛЯ СТАЦІОНАРНИХ УСТАНОВОК ПРОМИСЛОВИХ ВЕНТИЛЯТОРІВ

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

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

Мета роботи. Провести дослідження комутаційних процесів та розробити методика для визначення частоти комутації напівпровідникових елементів перетворювача для високовольтних електромеханічних систем з метою мінімізації електричних втрат при їх роботі з вентиляторним навантаженням.

Методи дослідження. Методи багатокритеріальної та однокритеріальної оптимізації для пошуку оптимальних значень електричних втрат електромеханічної системи, методи рішення системи диференціальних рівнянь першого порядку, аналітичні методи.

Отримані результати. Для підвищення рівня енергоефективності високовольтної електромеханічної системи для стаціонарних установок промислових вентиляторів без зміни їх конструктивних особливостей схеми оцінено рівень сумарних втрат. Побудовано цільову функцію залежності сумарних втрат в електроприводі від частоти комутації силових ключів та коефіцієнтів гармонічних спотворень струмів статора та ротора високовольтного асинхронного двигуна з фазним ротором. За допомогою апроксимації встановлено генеруючу залежність частоти ко-мутації силових ключів перетворювача від величини коефіцієнта спотворення гармонік струмів статора і приводного ротора асинхронного двигуна. Цільову функцію від трьох змінних приведено до виду функції від однієї змінної. Проведено імітаційне моделювання електромагнітних і енергетичних процесів в високовольтній електромеханічній системі з метою оцінки рівня сумарних втрат. Проведено порівняльний аналіз та визначена адекватність отриманого аналітичного виразу щодо визначення оптимальної частоти комутації силових елементів перетворювача при виконанні умови мінімізації втрат в високовольтній електромеханічній системі з результатами моделювання.

Наукова новизна. Проведено дослідження комутаційних процесів у силових елементах перетворювача що входить до структури високовольтної електромеханічної системи. Отримано більш точні аналітичні залежності, що дозволяють визначити основні та комутаційні втрати в силових елементах перетворювача для високовольтної електромеханічної системи.

Практична цінність. Запропоновано методика визначення оптимальної частоти комутації напівпровідникових елементів перетворювача що входить до структури високовольтної електромеханічної системи. Похибка розрахунку оптимальної частоти комутації напівпровідникових елементів перетворювача, що отримана аналітичним способом порівняно з результатами, отриманими за допомогою моделювання, не перевищує 3,5%. Запропонована мето-дика може бути використана в задачах мінімізації втрат в високовольтних електромеханічних системах електроприводу змінного та постійного струму, що застосовуються в різних областях промислових механізмів.

Ключові слова: частота комутації, оптимізація, втрати, енергоефективність, перетворювач, високовольтна електромеханічна система

AUTOMATION OF STUDIES OF PULSED CURRENT GENERATORS BASED ON THE TOPOLOGICAL-ISOMORPHIC MODEL

SIDELEV N.I. Ph.D, Docent, Associate Professor of the faculty of automatics and the computer-integrated technologies of the Black Sea National University of a name of Peter Mogila, Nikolaev, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4968-1607>; e-mail: nikolay.sidelev@chmmu.edu.ua.

Purpose. To evaluate the real usefulness of the topological-isomorphic model of powerful electromagnetic circuits on the example of the study of pulse current generators.

Methodology. Nodal potential method, Contour current method, Topologically isomorphic transformations.

Findings. The mathematical apparatus created and implemented as a program in MATLAB allows solving the problems of modeling and research of electromagnetic devices in parts (by types of stored energy). This makes it possible to simplify the research and optimization of such technical characteristics as efficiency, mass-dimensional indicators, etc. The magnetic circuit is depicted in the same detail as the electric circuit, and is described by a contour matrix. The mathematical description of electromagnetic devices determines the inductive parameters due to the geometric dimensions and characteristics of the magnetic conductors. The topology of the electrical circuit is represented by matrix blocks, which allows obtaining a mathematical description that simultaneously takes into account the distribution of currents and charges in the elements of the circuit. The system of equations is reduced to the Cauchy form and is composed taking into account the increments of magnetic fluxes and potentials on capacitors, which simplifies its solution by numerical methods on a computer. Thus, it is convenient to control the energy processes in the reactive energy-consuming elements of the circuit. The paper presents an example of research of a charger of a pulse current generator with an inductive-capacitive converter. In the research example, the expected qualitative characteristics were obtained.

Originality. The mathematical model of electromagnetic circuits does not provide for equivalent transformations associated with the geometric configuration of magnetic conductors. The topology of the electromagnetic circuit is presented in the form of separate matrices, which are connected by a matrix of coil connections.

Practical value. The implemented software in the MATLAB shell uses the parameters of magnetic conductors in the form of geometric dimensions of magnetic conductors and their technical characteristics. The results of modeling a powerful electromagnetic devices allows you to estimate the accumulated energy of the electric charge in capacitors and the magnetic field in magnetic circuits and to analyze the efficiency and possible impact on the environment. The presented data preparation technology allows us to investigate processes in more complex magnetic structures, for example, in magnetic flux-controlled transformers.

Keywords: electro-magnetic circuits; topological-isomorphic model; inductive-capacitive converters; pulse current generator; static electromagnetic devices; secondary power supplies, magnetic flux-controlled transformers.

I. INTRODUCTION

Pulse current generators (PCG) are secondary power sources for various technological processes. They are distinguished by high output power, so it is important to study their energy performance and characteristics. Among the loads for PCG, capacitive energy storages (CES) are often used; they are widely used in physical experiments due to a number of advantages: low internal resistance ($< 10^{-3}$ Ohm); low inductance (up to 10^{-9} H). This makes it possible to ensure a short discharge time (10^{-4} – 10^{-8} s), high efficient energy transfer to the load, and the possibility of achieving record values of power (up to 10^{13} W) and current rise rate (10^{13} A/s). In addition, CES have a number of operational conveniences: the absence of moving elements, ease of maintenance, a modular design principle that allows you to turn off and easily replace elements in case of accidental damage.

Computer modeling of electrical and electronic devices still plays a special role in the design of economical and technically efficient devices for various purposes. The main requirements for models should be the greatest degree of detail and ease of obtaining model parameters.

Design automation plays a special role in the power industry and, accordingly, in power electronics [1]. The development of automation in design tools is gaining momentum [2]. The derivation, modeling and control of power converter systems [3], a review of methods for verifying control algorithms in power electronics systems are considered in the works [4]. Attention is paid to the development of a model of converter losses that takes into account the physical dimensions of components, temperature dependence and parasitics of the circuit [5]. Research on the energy efficiency of powerful installations operating at industrial facilities and other

uses of mathematical modeling in the power industry have become very common [6].

In autonomous power systems, all devices can be divided into three groups: power sources, converters (or secondary power sources) and power consumers.

Technological devices that use electric discharge in a liquid [7] are used for drilling, crushing rocks [8], in water treatment technology for the decomposition of micropollutants [9], [10], in electric discharge plasma technology for wastewater treatment [11]. With the growing demand for energy and the associated emissions of greenhouse gases that reduce the available fossil fuels, technologies for processing heavy hydrocarbon raw materials and renewable energy sources, such as biofuels, are developing [12].

The working body of these devices are pulsed current generators (PCG), which use the energy of a charged capacitance. To charge capacitor banks, special chargers (chargers) are used that convert mains energy into high voltage energy. The efficiency and economy of the PCG as a whole depend on the circuit diagram and parameters of the charger. Therefore, increasing the efficiency factor (EF) of storage devices is a paramount task in their design.

II. ANALYSIS OF LAST RESEARCHES

The group of secondary power sources includes electronic and electrical devices that provide the conversion, accumulation and transformation of electricity into a load. Despite the different weight and size characteristics, the specifics of the circuit design and the method of energy transfer, for all secondary power supplies there are indicators that are always sought to be improved during design - these are EF, stability of external characteristics, stability during disturbances, etc.

Calculation of EF of devices is impossible without accurate calculation of energy in all elements of the circuit. The mathematical model used in this work is focused on this class of problems and is described in the following publications. In the article [13], a mathematical model of electromagnetic circuits with the highest degree of detail of both the electric and magnetic circuits was developed. The magnetic circuit is presented in the same detail as the electric one, and is described by a contour matrix. A mathematical description of electromagnetic devices was obtained, in which the inductive parameters are determined by the geometric dimensions and characteristics of the magnetic cores. The topology of the electric circuit is represented by matrix blocks, which made it possible to obtain a mathematical description that simultaneously takes into account the distribution of currents and charges in the circuit elements. In the work [14], the system of equations was reduced to the Cauchy form, which simplifies its solution by numerical methods on electronic computers. A stable mathematical model of electromagnetic circuits with feedback in matrix form [15, 16], convenient for implementation on digital computers, has been developed. The model is constructed with respect to the increments of magnetic fluxes and

potentials on capacitors.

The mathematical model of electromagnetic circuits (EMC), described in [16], is presented in the following form:

$$\begin{bmatrix} h^{-1}WY_{\rho}W^t + z^{-1}\Gamma_m R_m \Gamma_m^t & -z^{-1}WY_{\rho}A_{\varepsilon\rho}^t \\ -h^{-1}A_{\varepsilon\rho}Y_{\rho}W^t & h^{-1}A_{\varepsilon}CA_{\varepsilon}^t + z^{-1}A_{\varepsilon\rho}Y_{\rho}A_{\varepsilon\rho}^t \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta\Phi \\ \Delta V_{\varepsilon} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} WY_{\rho}(A_{\varepsilon\rho}^t V_{\varepsilon} + E) - F(\Phi) \\ -A_{\varepsilon\rho}Y_{\rho}(A_{\varepsilon\rho}^t V_{\varepsilon} + E) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

where

Φ - vector of magnetic fluxes in magnetic circuits;

V_{ε} - vector of electrical potentials on capacitors;

E - column vector of electromotive forces (EMF);

C - matrix of capacities of the electrical part of the circuit;

Y_{ρ} - conductance matrix of the electrical part of the circuit;

W - matrix of coiled engagements [13];

R_m - diagonal matrix of magnetic resistances;

Γ_m - the incidence matrix of the magnetic part of the circuit;

$F(\Phi) = \Gamma_m R_m \Gamma_m^t \Phi$;

h - integration step.

Matrix A is represented by a set of blocks described in [16]:

$$A = \begin{bmatrix} A_{\varepsilon} & A_{\varepsilon r} \\ A_o & A_r \end{bmatrix},$$

where matrix blocks are:

A_{ε} - Incident Matrix of incoming branches of the graph of the capacitive part of the electronic circuit;

A_o - Incident Matrix of outgoing branches of the graph of the capacitive part of the electronic circuit;

$A_{\varepsilon r}$ - Incident Matrix, where the resistive branches are incident with the capacitive;

A_r - Incident Matrix, where the resistive branches are not incident with capacitive branches.

Relatively $\Delta\Phi$ and ΔV_{ε} system (1) can be solved by any numerical method. Varying the value z , we can change the methods of numerical integration [16].

III. FORMULATION OF THE WORK PURPOSE

The main purpose of this work is to demonstrate the application of the matrix-topological model (1), described in [13]-[16], to the study of pulsed current generators containing massive magnetic parts of the circuit.

IV. EXPOUNDING THE MAIN MATERIAL AND RESULTS ANALYSIS

Among all types of chargers, circuits with inductive-

capacitive converters (ICCs) make it possible to obtain the maximum efficiency and, in the case of high ohmic resistance of the charging circuit, are optimal [7].

Let's consider the scheme of the charger with the ICC, shown in Fig.1.

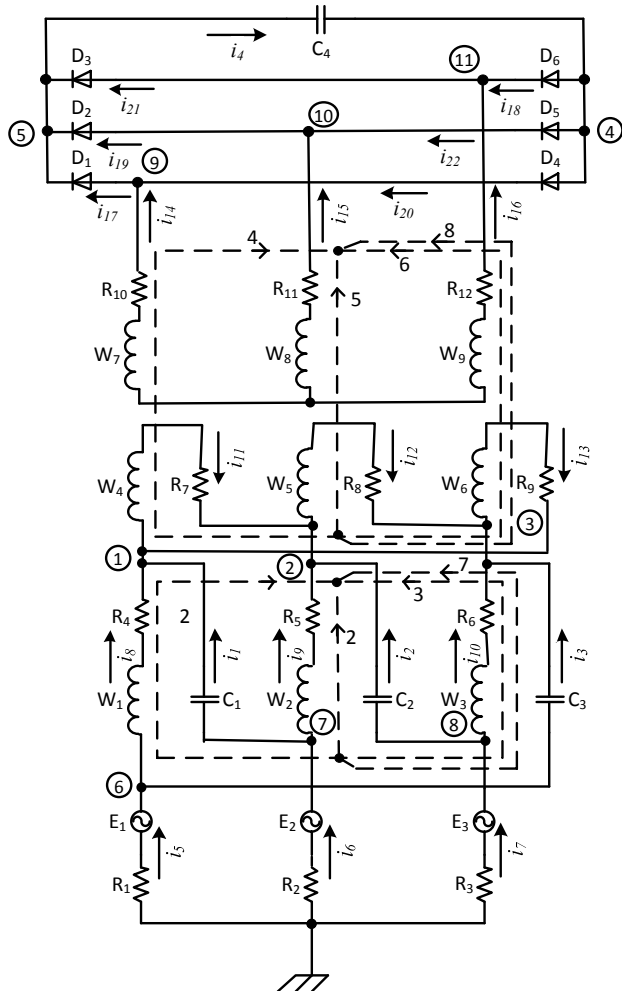


Figure 1. Electrical schematic diagram of the charger with ICC. The dotted line shows the graph of the magnetic circuit

To a three-phase alternating current network, represented by ideal sources of electromotive forces (EMF) $E_1 - E_3$ and active resistors $R_1 - R_3$, an ICC is connected, consisting of capacitors $C_1 - C_3$ and a three-phase choke. Structurally, the choke consists of a magnetic core with air gaps $\delta_1 - \delta_3$, on which windings with a number of turns $W_1 - W_3$ and active resistances $R_4 - R_6$ are mounted. A step-up transformer is connected to the output of the ICC, where - low voltage windings (LVW) and - high voltage windings (HVW). The active resistance of the LVW in the diagram (Fig.1) is $R_7 - R_9$, HVW, respectively, $R_{10} - R_{12}$. The leakage magnetic

fluxes of the inductor and transformer can be taken into account by introducing additional magnetic branches (branches 7 and 8 in Fig.1).

The alternating current at the output of the transformer is rectified by semiconductor diodes $D_1 - D_6$ and used to charge the capacitive energy storage C_4 .

The graph of the electric circuit of the charger (Fig. 1) consists of 11 nodes and 22 branches and is represented by a topological matrix A (see Fig. 2).

Nodes	Branches											Nodes										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
1																						
2	-1																					
3		-1																				
4			-1																			
5				-1																		
6					1																	
7						-1																
8							1															
9								-1														
10									1													
11										-1												

Figure 2. Incident matrix for a charger circuit with an ICC

According to the number of capacities, 5 branches and 5 nodes belonging to the capacity subgraph are separated into a separate block A_e . The remaining branches and nodes make up a resistive subgraph (block A_p).

The graph of the magnetic circuit is shown in Fig. 3. The branches are numbered in accordance with Fig. 1.

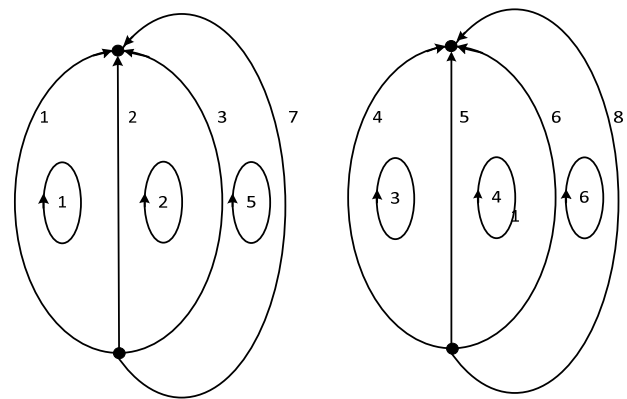


Figure 3. Graph of the contour matrix of the magnetic circuit

The directions of the contours of the magnetic circuit were chosen and the contour matrix G_m was compiled (Fig. 4).

The magnetic connection between the electric and magnetic graphs is provided by a matrix W (Fig. 5).

We begin the work of the charger model under the following initial conditions: the voltage on all capacitors,

the currents and magnetic fluxes in all branches are equal to zero.

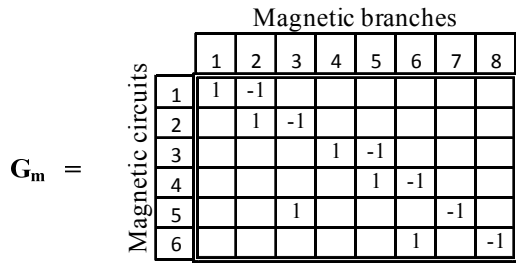


Figure 4. Contour matrix of the magnetic circuit

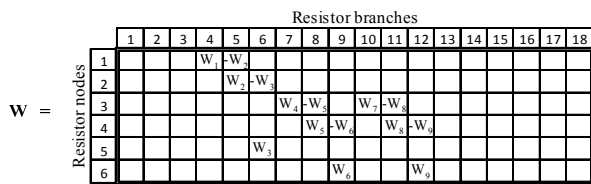


Figure 5. Matrix of mutual contours

During the operation of the charger, the charging current is parametrically stabilized by the phenomenon of voltage resonance in the ICC, and is independent of the capacitor bank voltages C_4 . To ensure that the voltage on the capacitance C_4 grows linearly (Fig. 6) due to the constant charge current (Fig. 7), the ICC must allocate linearly increasing energy to the load.

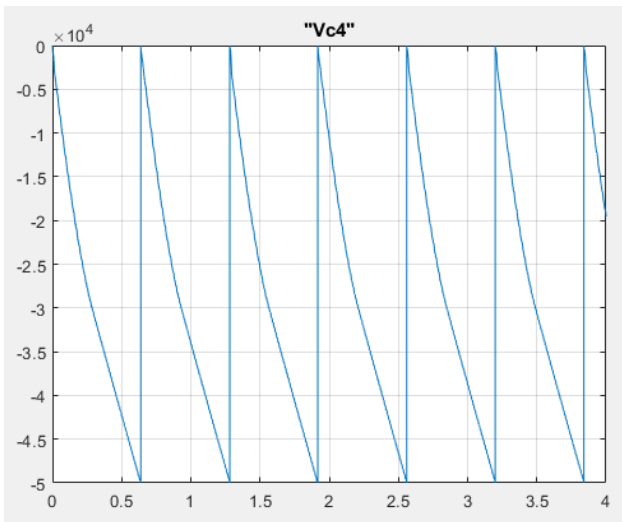


Figure 6. Voltage on the capacitance grows linearly

This is provided by a ramping current at the input of the ICC (Figure 8) and a ramping voltage at the output of the ICC (Figure 9).

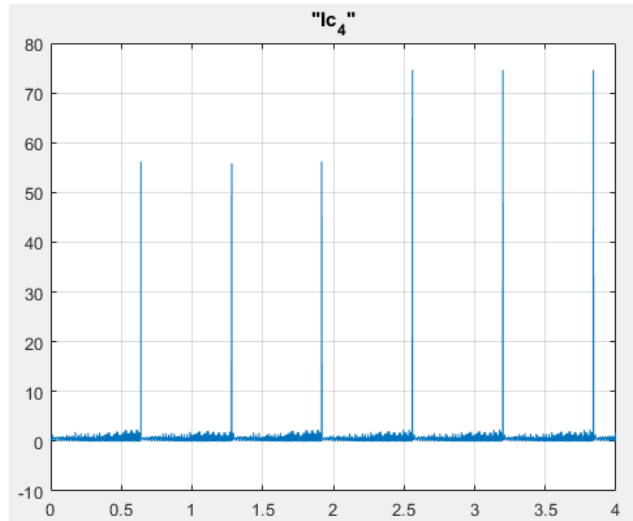


Figure 7. The constant charge current

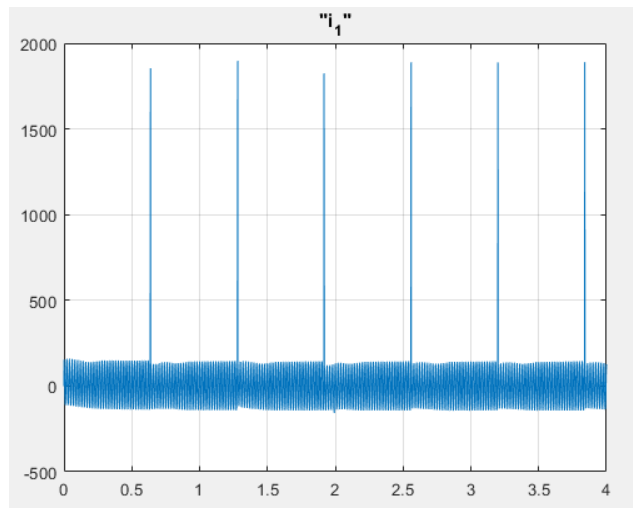


Figure 8. A ramping current at the input of the ICC

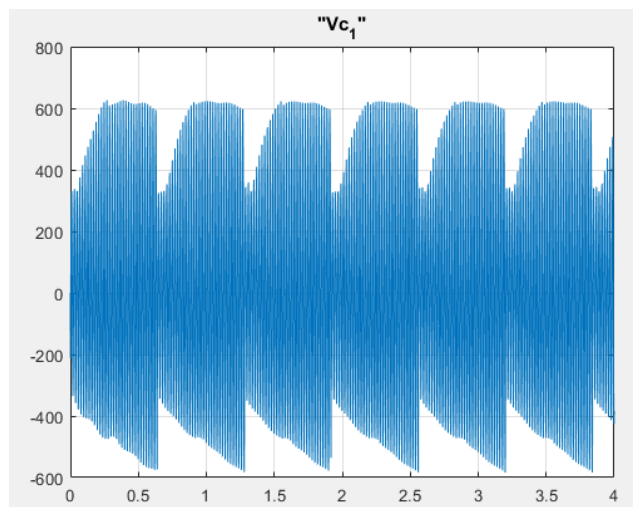


Figure 9. A ramping voltage at the output of the ICC

At the same time, the constancy of the amplitude value of the current is ensured at the output of the ICC (Fig. 10).

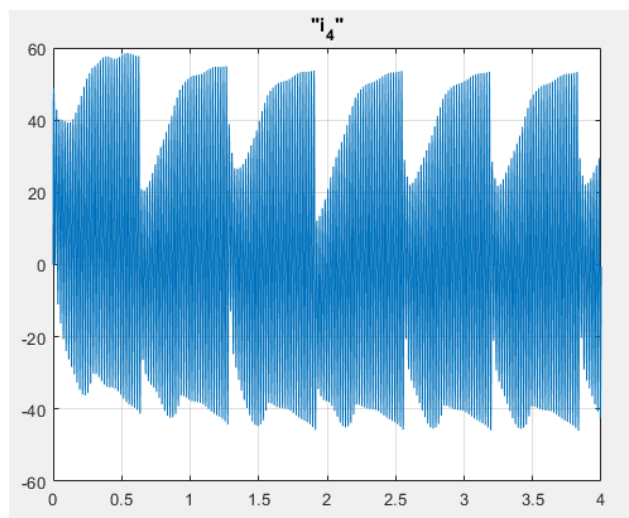


Figure 10. The current at the output of the ICC

Figure 11 shows the magnetic fluxes in the three cores of the ICC and separately the magnetic flux of leakage on it.

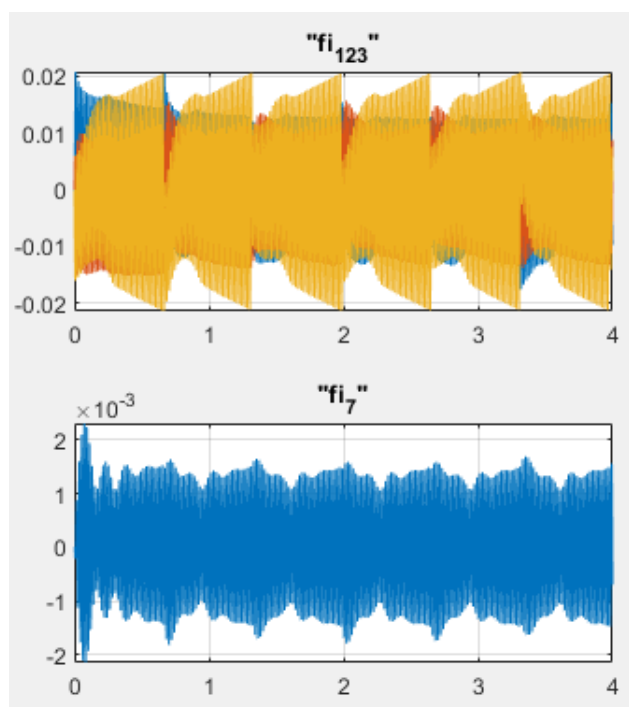


Figure 11. Magnetic fluxes acting in the magnetic cores of the ICC ($f_{i_{123}}$) and in external space (f_{i_7})

Efficiency calculation. The efficiency is calculated as follows:

$$\eta = \frac{W_{C4}}{W_{\rho}},$$

where W_{C4} is the energy accumulated in the capacitor C_4 for the entire charge time (t_z); W_{ρ} - active energy consumed from the network during the time t_z .

The simulation results of the ICC charger (Figure 1) can be explored with experimental tests. The efficiency of the model is 92%, according to the experiment - 90%. The result turned out to be overestimated due to the fact that the model did not take into account the hysteresis losses in the magnetic cores.

In this paper, some graphs of the process of charging the load capacity are given, however, diagrams of currents, voltages and magnetic fluxes can be obtained in all branches and nodes of the circuit. The high information content of the software makes it possible to increase the efficiency of the study of chargers, for example: to check the reliability of the simulation, to identify resonant circuits and evaluate their frequency, to investigate the effect of nonlinearities of magnetic components, etc. Modern computing tools enable the developer of complex technological devices to increase the share of creative work and improve the quality of the products being developed.

V. CONCLUSION

1. The developed software (software), compiled according to the mathematical model (1), successfully implements calculations for powerful technological devices with electromagnetic circuits.
2. The software simplifies the preparation of data for the model by not using preliminary calculations of the parameters of the magnetic part of the circuit.
3. The software allows you to obtain graphs of instantaneous values of voltages and currents of the transient process in all elements of the electrical part.
4. The software allows you to obtain graphs of instantaneous values of magnetic fluxes in the metal cores of electromagnetic converters and magnetic fluxes of dissipation.
5. The result of modeling a powerful electromagnetic device allows you to estimate the accumulated energy of the electric charge in capacitors and the magnetic field in magnetic circuits and to analyze the efficiency and possible impact on the environment.

REFERENCE

- [1] Kevin Hermanns, Yarui Peng, H.A. Mantooth. (2020). The Increasing Role of Design Automation in Power Electronics: Gathering What Is Needed. *IEEE Power Electronics Magazine* 7(1):46-50. DOI: 10.1109/MPPEL.2019.2959706
- [2] Ashok Bindra, H.A. Mantooth. (2019). Modern Tool Limitations in Design Automation: Advancing Automation in Design Tools is Gathering

- Momentum. *IEEE Power Electronics Magazine*, 6(1):28-33. DOI: 10.1109/PEL.2018.2888653
- [3] Yuzhuo Li, Johannes Kuprat, Yunwei Ryan Li, Yunwei Ryan Li, Marco Liserre, Marco Liserre. Graph-Theory-Based Derivation, Modeling and Control of Power Converter Systems. January 2022IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics PP(99):1-1 DOI: 10.1109/JESTPE.2022.3143437.
- [4] Pawel Szczesniak, Pawel Szczesniak, Iwona Grobelna, Iwona Grobelna, Mateja Novak, Mateja Novak, Ulrik Nyman, Ulrik Nyman. (2021). Overview of Control Algorithm Verification Methods in Power Electronics Systems. *Energies* 14(14):4360 DOI: 10.3390/en14144360.
- [5] Andrea Stratta, Davide Gottardo, Mauro Di Nardo, Jordi Espina, Mark C. Johnson. (2021). Optimal Integrated Design of a Magnetically Coupled Interleaved H-Bridge. *IEEE Transactions on Power Electronics* PP(99):1-1. DOI: 10.1109/TPEL.2021.3094025/
- [6] Mahmoud Mossa, Ahmed Diab, Najib El Ouanjli. (2021). Special issue (Contemporary Mathematics Journal): Mathematical Modelling for Electric Power Systems. DOI: 10.13140/RG.2.2.13085.79841
- [7] Pentegov I.V. (1982). Fundamentals of the theory of charging circuits of capacitive energy storage devices. Kyiv: Naukova Dumka, 424.
- [8] Nazieh Hasan, S. Yu. Makeiev, V. I. Emeljanenko, V. Ja. Osinniy. (2017). The Application of the Electric Discharge Technologies for Mining and Metallurgical Industry. ICIME 2017: *Proceedings of the 9th International Conference on Information Management and Engineering*, 196–200. <https://doi.org/10.1145/3149572.3149592>.
- [9] Electrical Discharge in Water Treatment Technology for Micropollutant Decomposition. WRITTEN BY Patrick Vanraes, Anton Y. Nikiforov and Christophe Leys. Submitted: May 16th, 2015 Reviewed: October 23rd, 2015 Published: April 20th, 2016. DOI: 10.5772/61830.
- [10] Malyushevskaya, A.P.; Koszelnik, P.; Yushchishina, A.; Mitryasova, O.; Mats, A.; Gruca-Rokosz, R. Synergy (2017). Effect during Water Treatment by Electric Discharge and Chlorination. *Environments* 10, 93. <https://doi.org/10.3390/environments10060093>.
- [11] Bo Jiang; Jingtang Zheng; Shi Qiu; Mingbo Wu ; Qinhuai Zhang; Zifeng Yan; Qingzhong Xue. (2014). Review on electrical discharge plasma technology for wastewater remediation. *Chemical Engineering Journal*. Vol. 236, 15 January, 348-368.
- [12] Titov, E.; Bodrikov, I.; Titov, D. (2023). Control of the Energy Impact of Electric Discharges in a Liquid Phase. *Energies*, 16, 1683. <https://doi.org/10.3390/en16041683>.
- [13] Krasnov, V. V. and Siddelev, N. I. (2013), “Matrix-topological description of electromagnetic circuits” [Matrychno-topologichnyj opys elektromagnitnyh kil], *Electrical and Computer Systems, Technica, Kiev, Ukraine, Vol. 11 (87)*, pp. 66-73.
- [14] Siddelev, N. I. (2015), “Matrix-topological description of electromagnetic circuits in the form Cauchy” [Matrichno-topologicheskoe opisanie jelektromagnitnyh cepej v forme Koshi], *Electrical and Computer Systems, Science and Technical, Ukraine, Vol. 20 (96)*, pp. 63-73.
- [15] Siddelev, N. I. (2017), “Manage digital model based on matrix-topological description electromagnetic circuits” [Upravlyaemaya tsifrovaya model na osnove matrichno-topologicheskogo opisanija elektromagnitnyh tsepej], *Electrical and Computer Systems, Science and Technical, Ukraine, Vol. 26 (102)*, pp. 32-40.
- [16] Siddelev N. I. (2018). Matrix-topological model of elec-tromagnetic circuits. *Electrical engineering and power engineering*, Ukraine, Zaporizhzhia: ZNTU,. Vol. 1, pp. 5-14.

Received 09.01.2025;

Accepted 05.04.2025;

Published 30.04.2025.

УДК 621.314

АВТОМАТИЗАЦІЯ ДОСЛІДЖЕНЬ ГЕНЕРАТОРІВ ІМПУЛЬСНОГО СТРУМУ НА ОСНОВІ ТОПОЛОГІЧНО-ІЗОМОРФНОЇ МОДЕЛІ

СІДЕЛЄВ М.І.

канд.техн.наук, доцент, доцент кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій Чорноморського національного університету імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4968-1607>, e-mail: nikolay.sidelev@chmnu.edu.ua.

Мета роботи. Оцінити реальну корисність топологічно-ізоморфної моделі потужних електромагнітних кіл на прикладі дослідження генераторів імпульсного струму.

Методи дослідження. Метод вузлових потенціалів, Метод контурних струмів, Топологічно-ізоморфні перетворення.

Отримані результати. Створений і програмно реалізований математичний апарат у MATLAB дозволяє

вирішувати задачі моделювання та дослідження електромагнітних пристроїв по частинах (за видами накопиченої енергії). Це дає змогу спростити дослідження та оптимізацію таких технічних характеристик, як коефіцієнт корисної дії, масогабаритні показники тощо. Магнітопровід зображується так само детально, як і електрична схема, і описується контурною матрицею. Математичний опис електромагнітних пристроїв визначає індуктивні параметри, обумовлені геометричними розмірами, характеристиками магнітопроводів та обмоточними даними. Топологія електричного кола представлена матричними блоками, що дозволяє отримати математичний опис, який одночасно враховує розподіл струмів і зарядів в елементах електричного кола. Система рівнянь приведена до форми Коші та складена з урахуванням приrostів магнітних потоків і потенціалів на конденсаторах, що спрощує її розв'язування чисельними методами на електрообчислювальних машинах. Таким чином, зручно контролювати енергетичні процеси в реактивних енергоспоживаючих елементах схеми. Розроблене програмне забезпечення (ПЗ) за представленою математичною моделлю, успішно реалізує розрахунки для потужних технологічних пристроїв з електромагнітними ланцюгами. ПЗ спрощує підготовку даних до моделі за рахунок не використання попередніх розрахунків параметрів магнітної частини кола, дозволяє отримати графіки миттєвих значень напруг і струмів перехідного процесу в усіх елементах електричної частини, дозволяє отримати графіки миттєвих значень магнітних потоків в металевих сердечниках електромагнітних перетворювачів та магнітних потоків розсіювання. У роботі наведений приклад дослідження зарядного пристрою генератора імпульсного струму з індуктивно-ємнісним перетворювачем. У прикладі дослідження були отримані очікувані якісні характеристики.

Наукова новизна. Математична модель електромагнітних кіл не передбачає еквівалентних перетворень, пов'язаних з геометричною конфігурацією магнітопроводів. Топологія електромагнітного кола представлена у вигляді окремих матриць, які з'єднані матрицею з'єднань котушок.

Практична цінність. Реалізоване програмне забезпечення в оболонці MATLAB використовує параметри магнітопроводів у вигляді геометричних розмірів магнітопроводів та їх технічних характеристик. Результати моделювання потужних електромагнітних пристроїв дозволяють оцінити накопичену енергію електричного заряду в конденсаторах і магнітне поле в магнітопроводах, проаналізувати коефіцієнт корисної дії і можливий вплив на навколишнє середовище. Представлена технологія підготовки даних дозволяє досліджувати процеси в більш складних магнітних конструкціях, наприклад, як в трансформаторах, що керуються магнітним потоком.

Ключові слова: електромагнітні кола; топологічно-ізоморфна модель; індуктивно-ємнісні перетворювачі; генератор імпульсного струму; статичні електромагнітні пристрої; вторинні джерела живлення; трансформатори з керуванням магнітним потоком.

ОСОБЛИВОСТІ СТВОРЕННЯ СИСТЕМ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ КОСМІЧНИХ РАКЕТНИХ КОМПЛЕКСАХ

- РЕВА В.С. аспірант, начальник групи Державне Підприємство Конструкторське Бюро «Південне» ім. М.К. Янгеля, вул. Криворізька, 3, Дніпро, Україна, 49008, e-mail: reva.vad@ukr.net, ORCID: 0000-0002-1104-8398;
- ЛИСЕНКО О.Г. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електропривода Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», проспект Дмитра Яворницького, 19, Дніпро, Україна, e-mail: lysenkoag@ukr.net, ORCID: 0000-0002-7041-671X;
- УДОВИК О.В. аспірант кафедри електроенергетики Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», проспект Дмитра Яворницького, 19, Дніпро, Україна, e-mail: udovyk.o.v@nmu.one, ORCID: 0009-0002-1000-7815;

Мета роботи. *Вирішення питань якості електроенергії на космічних ракетних комплексах шляхом розробки та створення систем контролю якості електроенергії (СКЯЕ). Розробка структури та визначення алгоритмів СКЯЕ в системах електропостачання космічних ракетних комплексів СЕП КРК із забезпеченням заданих параметрів електроенергії.*

Методи дослідження. *Огляд літературних джерел з тематики, метод експертних оцінок, метод системного аналізу, метод експериментального дослідження.*

Отримані результати. *Наведено показники якості електроенергії, які найбільш важливі для електроспоживачів КРК, контроль яких необхідно здійснювати. Визначено основні вимоги, пред'явлені до СКЯЕ, у разі виходу за допустимі межі показників якості електроенергії СКЯЕ дозволить зробити оперативні заходи необхідні для парирования нештатних ситуацій, завдяки управлінню елементами системи електропостачання. Проведено інформаційне забезпечення з побудовою загальноприйнятої структурної блок-схеми подібних систем, на основі якої реалізована трирівнева структура СКЯУ. Розглянуто алгоритм і основні принципи роботи СКЯУ в звичайному режимі і режимі виходу за межі норм показників якості електроенергії (ПЯЕ). Викладено короткий опис структури, а також приклад алгоритму управління повідомленнями СКЯУ.*

Наукова новизна. *Вирішено завдання комплексного підходу до питань якості електроенергії та створено трирівневу структуру системи контролю якості електроенергії в системах електропостачання КРК. Мікропроцесорні засоби контролю в першу чергу забезпечують швидкодію у порівнянні з подібними системами на аналого-цифрових перетворювачах. Запропонована СКЯУ здійснює контроль якості електроенергії з виведенням даних на екран оператора саме у реальному часі, веденням безперервного моніторингу з фіксацією та реєстрацією основних параметрів, а також оповіщенням оператора при виникненні нештатних ситуацій.*

Практична цінність. *Розроблено виготовлено та вдало пройдено усі види випробувань системи контролю якості електроенергії для КРК «Циклон-4» (Бразилія), та частково КРК «Циклон-4М» (Канада).*

Ключові слова: *якість, електроенергія, система електропостачання, контроль, структура, споживач, принцип роботи.*

I. ВСТУП

При створенні системи електропостачання (СЕП) перспективних космічних ракетних комплексів (КРК), що проєктуються необхідно враховувати енергоємність споживачів технологічного обладнання (ТО) і технічних систем (ТС) задіяних у підготовці РКН, а також збільшення кількості споживачів різних номіналів напруги, в тому числі і низьковольтного обладнання. Для цього необхідно на ранньому етапі проєктування визначити склад і характеристики електрообладнання систем розташованих на наземному комплексі КРК. Так, наприклад аналіз вихідних даних (ВД) споживачів ТО і ТС показав, що на КРК «Дніпро» споживання становило трохи більше

1 МВт, при проєктуванні КРК «Циклон-4» збільшилося і стало близько 4,5 МВт. У теперішній час проєктування сучасних перспективних КРК обумовлюється потужністю споживачів щонайменше 6МВт.

До недавнього часу з боку енергопостачальних організацій питанням контролю та забезпечення якості електричної енергії не приділялося достатньої уваги, що при великих сумарних потужностях нерідко призводило до порушення функціонування технологічного обладнання, підключеного до електричної мережі. Спотворення показників якості електроенергії, що поширюються одними споживачами в СЕС і вихід з ладу будь-якого

компонента системи електропостачання з іншого боку – стає дуже серйозним порушенням робіт з підготовки РКН до пуску. Одночасний автоматизований моніторинг у різних точках СЕП – це крок для першого знайомства з проблемою ЯЕ, виявлення тенденцій зміни контрольних параметрів у часі, які забезпечують попереджувальний прогноз для інших споживачів електроенергії[1] - [4].

II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Існує дві основні групи спотворень якості електричної енергії: стаціонарні спотворення, та які змінюються у часі. Гармоніки та інтергармоніки, коливання напруги і небаланс напруг відносяться до першої групи, а перехідні процеси напруги, зниження/перевищення напруги, переривання напруги та інші високочастотні спотворення складають другу групу.

Велика кількість методів обробки інформаційних сигналів використовується для визначення показників якості електричної енергії. Так одним із найбільш поширених є, так званий, метод середньоквадратичних значень на основі апроксимації кривої вхідного сигналу спеціальною функцією, яка забезпечує задовільну апроксимацію амплітуди основної частоти електричної мережі.

Найбільш широко використовуваним апаратом для аналізу параметрів якості електричної енергії є швидке перетворення Фур'є, яке трансформує сигнал із часового простору у частотний його декомпозицією на декілька частотних компонентів. Але алгоритм Фур'є має декілька джерел методичних похибок, які призводять до зниження точності результатів аналізу та його якісного спотворення [5].

Стосовно до електроенергетичних систем необхідно відмітити їх особливість – це наявність в одному інтервалі часу (періоді) декількох типів спотворень сигналу. Ідентифікація двох типів спотворень висвітлена такими вченими, Abdel-Galil (2004 р.) [6] та He (2006 р.) [7].

Застосування вейвлет-аналізу для ідентифікації і класифікації спотворень якості електричної енергії інтенсивно почало розроблятися на початку 2000 року. Слід відмітити роботи Yang (2000 р.), Elmitwally та Yang (2001 р.) [8], головною метою яких ставилось усунення шуму спотвореного сигналу його визначенням та локалізацією. Методи, засновані на вейвлет перетворенні, дозволяють значно скоротити обсяг інформації, що передається, про параметри електроенергії, що значною мірою задовольняє принципи побудови систем контролю ЯЕ.

Аналіз застосування даних методів дозволив окреслити найважливіші проблеми при класифікації спотворень електричної енергії, які не достатньо вирішені на даний час. До яких можливо віднести, що нормування окремих показників якості електричної

енергії (ПЯЕ) здійснюється за умови, що в даний момент часу має місце тільки один тип порушення ЯЕЕ. Тобто, одночасна дія декількох типів спотворень не розглядається і не враховується. А також і те, що на даний час відсутній безперервний контроль параметрів ЯЕЕ.

Виходячи із вищенаведеного, для побудови системи моніторингу параметрів якості електричної енергії для КРК, необхідно розробити такі методи та алгоритми, що їх реалізують, які дозволять:

- визначити та ідентифікувати відхилення параметрів ЯЕ незалежно від типу електрообладнання, що спричинило дані спотворення;
- забезпечити виявлення причини виникнення відхилення показників ЯЕ та встановити джерело такого спотворення;
- розробити узагальнений параметр визначення наявності спотворення ЯЕ, який би дозволив проведення моніторингу якості електричної енергії у реальному часі.

Приклади систем сучасного моніторингу показників якості електроенергії представили наступні вчені Гриб [9], Володарський [5] та Coleman [10]. Моніторинг показників якості електроенергії на базі сучасних SMART GRID систем наведено у Сінчук [11] та Бунько [12]. Слід відзначити, що структура та загальні принципи побудови існуючих автоматизованих систем контролю та обліку електроенергії розкриті у [13] та [14].

У даній статті розглянуто підхід до побудови системи контролю якості для визначення наявності спотворення якості електроенергії, час його появи та тривалості у реальному часі для КРК.

III. МЕТА РОБОТИ

Метою роботи є вирішення питань якості електроенергії на космічних ракетних комплексах шляхом розробки та створення систем контролю якості електроенергії. Розробка структури та визначення алгоритмів СКЯЕ в системах електропостачання космічних ракетних комплексів СЕП КРК із забезпеченням заданих параметрів електроенергії.

IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГУ МАТЕРІАЛУ І АНАЛІЗ ОТРИМАННИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Усього стандартами встановлено більше одинадцяти показників якості електроенергії, однак для СЕП КРК найбільш важливими є: підвищена і знижена напруга, високовольтні імпульси, гармонічні спотворення напруги, нестабільна частота, провали напруги. Знижена якість електроенергії надає негативний вплив, як на роботу окремих споживачів, так і на нормальне функціонування енергосистеми в цілому.

наведеною на рисунку 2.

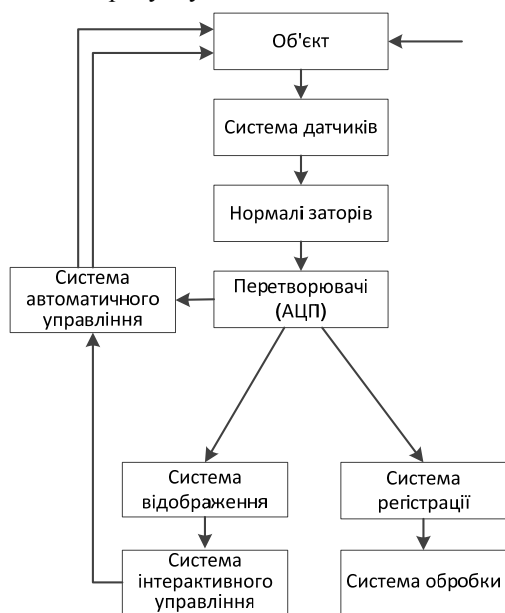


Рисунок 2. Загальноприйнята структурна блок-схема.

Зчитування інформації стану об'єкта здійснюється пристроями зв'язку з об'єктом, до складу якого входять системи датчиків, нормалі заторів і перетворювачів інформації (АЦП). Система датчиків забезпечує вимірювання параметрів і змінних аналізованого об'єкта і перетворює їх в електричну форму. Блок нормалі заторів забезпечує початкову обробку інформації датчиків, в разі необхідності виконує фільтрацію сигналів, лінеаризацію характеристик датчиків і масштабування сигналів для приведення їх до стандартизованих шкалах, АЦП створюють потоки цифрової інформації про об'єкт. Наведені етапи отримання та попередньої обробки інформації можуть забезпечуватися також інтегрованими системами датчиків - перетворювачів.

Подібна структурна схема характерна для більшості енергетичних об'єктів, безперервних виробництв, транспортних систем і об'єктів.

Для забезпечення якісним, безперебійним, надійним електроживленням споживачів електроенергії технологічного устаткування космічних ракетних комплексів було прийнято рішення про створення повноцінної системи контролю якості електроенергії СКЯЕ.

Основною задачею створеної СКЯЕ є забезпечення контролю параметрів живлення на затискачах електроспоживачів технологічного обладнання (ТО) за допомогою контролю осцилограм напруги змінного струму, значень напруги 380/220В і 28,5В, значень частоти і коефіцієнта несинусоїдності напруги змінного струму.

А також СКЯЕ має забезпечувати:

- контроль положення автоматичних вимикачів

вступних і відхідних фідерів та положення секційного вимикача в шафах СЕП (контроль та реєстрація спрацьовування протиаварійного захисту);

- контроль справності джерел безперебійного живлення (ДБЖ);

- управління (включення/відключення) вводами №1 та №2, вимикачем автоматичного введення резерву (АВР); ДБЖ, вентиляцією, ДЕА;

- запис та зберігання осцилограм напруги змінного струму та напруги 28,5 В на роз'ємах споживачів за 10 хв до аварії;

- формування та видача даних оператору;

- архівування історії зміни параметрів;

- тестування та самодіагностику стану складових частин СЕС.

Крім того, СКЯЕ повинно виконувати реєстрацію та відображення параметрів живлення електроспоживачів, контроль працездатності СЕП загалом та її складових частин із прив'язкою до системи єдиного часу.

На рис. 3 представлена загальна структура створеної СКЯЕ.

Зчитування інформації стану електроспоживачів здійснюється групою датчиків і перетворювачів інформації. Система датчиків забезпечує вимірювання параметрів і змінних аналізованого споживача і перетворює їх в цифрову форму. Далі через контролери інформація передається на систему відображення (АРМ оператора). Етапи отримання та попередньої обробки інформації можуть забезпечуватися також інтегрованими системами датчиків - перетворювачів.

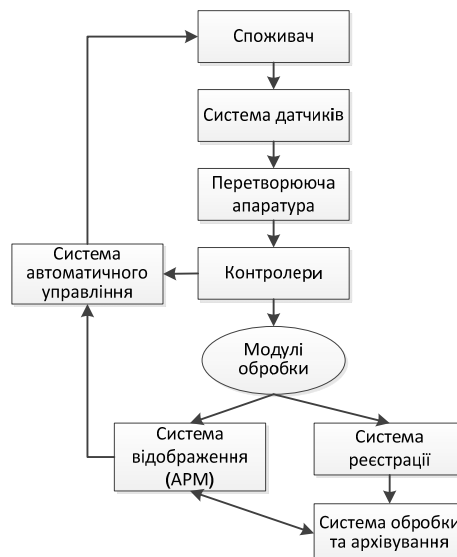


Рисунок 3. Структурна схема системи контролю якості електроенергії

Структура СКЯЕ реалізована трьома базовими рівнями (рис.4).

а) Перший рівень. Перший рівень (польовий) - забезпечує прийом сигналів від датчиків технічних систем і датчиків контролю стану обладнання. Обсяг цієї інформації забезпечує відображення реальної картини технологічного процесу і стану обладнання. Рівень складається з розміщених в шафах і щитах СЕП груп датчиків, контролерів вводу аналогових сигналів, промислових контролерів, перетворювачів напруги.

б) Другий рівень. Другий рівень реалізує виконання рішень по автоматизації технологічного процесу технічних систем. Рівень реалізований на програмованих логічних контролерах (ПЛК), які обробляють сигнали, що надходять від контролерів локальних пристроїв, датчиків, здійснюючи контроль технологічних параметрів технічних систем і контроль стану обладнання.

Апаратура другого рівня встановлена у складових частинах СКЯЕ (щитах і шафах).

в) Третій рівень. Третій ієрархічний рівень – це рівень діалогу оператор - система управління (рівень управління і спостереження).

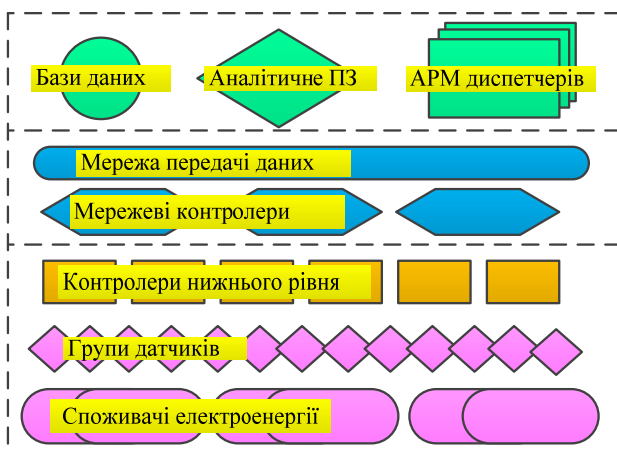


Рисунок 4. Трирівнева структура СКЯЕ

На цьому рівні оператори мають доступ до інформації, що дозволяє здійснювати контроль і управління технологічними процесами технічних систем. Рівень складається з АРМ оператора, керованих комутаторів мереж Ethernet, ПО і бази даних.

Управління та обмін даними з СКЯЕ забезпечується по каналах мережі Modbus за допомогою пристрою сполучення з шиною Modbus / RTU.

Вимірювальні входи перетворювачів підключені до шин і вводів у виробач і виконують перетворення напруги трифазної мережі змінного струму 220/380 V сигнали (4-20) mA постійного струму, пропорційні вимірюванім фазним напруженням. Контролер вводу аналогових сигналів приймає сигнали постійного струму (4-20) mA, що надходять від перетворювачів і

трансформує у цифрову форму для передачі по мережі. [19] - [24]

Програмне забезпечення (ПО) системи являє собою сукупність програмних засобів, що забезпечують спільно з технічними засобами збір даних і диспетчерське управління. Наприклад SCADA-система "Vijeo Citect" здійснює контроль і управління технологічним обладнанням, а також взаємодію з оперативними і експлуатаційним персоналом СЕП НК.

В системі також реалізовані наступні завдання:

- архівування ходу процесів у вигляді трендів;
- архівування протоколів післяаварійних ситуацій;
- архівування протоколів подій;
- обмін даними з ПЛК в реальному часі;
- управління попереджувальними і тривожними повідомленнями.

Зчитування інформації стану електроспоживачів здійснюється групою датчиків і перетворювачів інформації. Система датчиків забезпечує вимірювання параметрів і змінних аналізованого споживача і перетворює їх у цифрову форму. можуть забезпечуватися також інтегрованими системами датчиків – перетворювачів. енергетичних промислових об'єктів.

Блок-схема алгоритму з переключення між джерелами живлення СЕП (ввод1, ввод2, резервний ввод) зовнішньої роботи СКЯЕ представлено на рис.5.

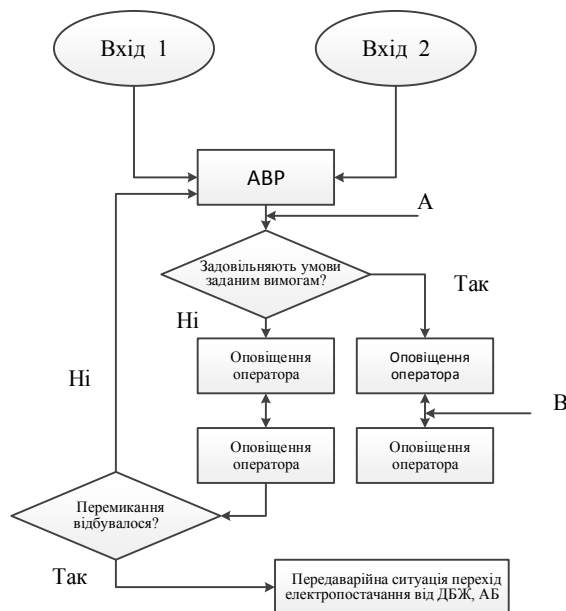


Рисунок 5. Блок-схема алгоритму зовнішньої роботи СКЯЕ

Вхід системи електропостачання здійснюється від двох незалежних джерел живлення (і одного резервного), перемикання між якими виконується за

допомогою включення автоматичного введення резерву (АВР). Вимірювання таких основних параметрів як напруга, частота, струм і коефіцієнт несинусоїдальності системою контролю якості виконується на двох рівнях, показаних на рис. 1, в точці А - на вводі в систему і в точці В - безпосередньо на шинах вводу споживача при цьому сигналізуючи оператору про отримані результати. СКЯЕ виробляє порівняння значень номінальних параметрів електроенергії з допустимими, в разі збою відбувається автоматичне включення резервного вводу і подається сигнал оператору. Повернення на робочий вхід системи за допомогою АВР після минулої позаштатної ситуації можливий тільки після усунення несправності на лінії. [25], [26].

На рис. 6 представлена спрощена схема підключення СКЯЕ, де під блоком «М» показана сума модулів і датчиків, що передає інформацію параметрів електроенергії від шин живлення вводу в систему або безпосередньо від споживачів. Перетворена інформація йде на керований комутатор, який живиться від блоку живлення, за допомогою зв'язку Ethernet інформація передає сигнал на монітор оператора СКЯЕ.

Перевірка готовності пристроїв СКЯЕ і каналів зв'язку Modbus виконується контролерами Modicon M340 по алгоритмам, наведеним вище. Дані зчитуються серверами баз даних SERVKL-2 (2E101_1, 2E101_2), реєструються в базі даних і відображаються на мнемосхемах на моніторі оператора АРМ WSKL-3

(2E101_3).

Принцип побудови системи контролю якості електроенергії та управління був повноцінно впроваджений до складу системи електропостачання для космічного ракетного комплексу «Циклон-4». На систему було розроблено повний комплект експлуатаційної і робочої конструкторської документації. На виробничих і випробувальних потужностях Корпорації «ЕЛКОР» (м.Харків) були виготовлені складові частини систем електропостачання та СКЯЕ. По закінченню виготовлення повноцінно проведено ряд випробувань силової частини і СКЯЕ відповідно до ТЗ і ПМД. Дані зчитуються серверами та заносяться до бази даних і відображаються на мнемосхемах на моніторі оператора АРМ.

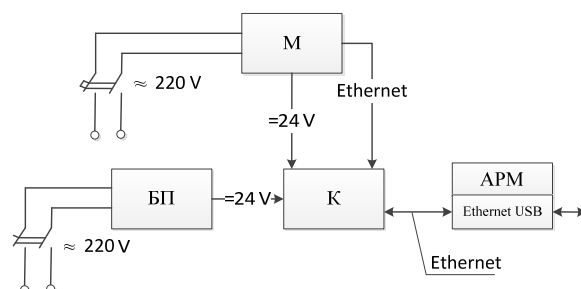


Рисунок 6. Схема підключень СКЯЕ

Приклад мнемосхеми оператора наведено на рис. 7

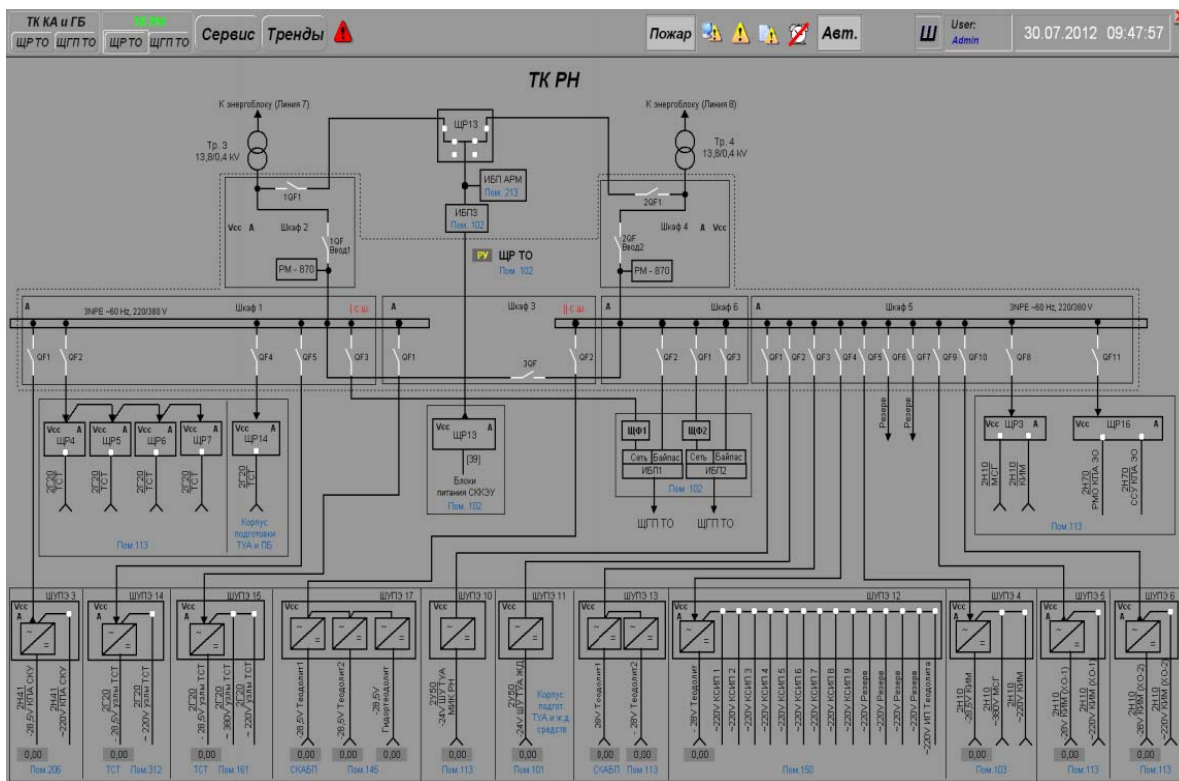


Рисунок 7. Мнемосхема програмного вікна оператора СКЯЕ для відстеження показників якості електроенергії.

V. ВИСНОВОК

Для вирішення завдання комплексного підходу до питань якості електроенергії та створено тривірневу структуру системи контролю якості електроенергії в системах електропостачання КРК. Запропонована та створена СКЯУ здійснює контроль якості електроенергії, за допомогою загальноприйнятих методів контролю показників ЯЕ, з виведенням даних на екран оператора саме у реальному часі, веденням безперервного моніторингу з фіксацією та ресстрацією основних параметрів, а також оповіщенням оператора при виникненні нештатних ситуацій.

Розроблена система контролю якості електроенергії та управління дозволяє підвищити енергетичну ефективність систем електропостачання, надійність і безвідмовність роботи СЕП у цілому, зменшити рівень втрат електроенергії в мережі, попередити і парирувати позаштатні ситуації в СЕП, що виникають у всіх режимах експлуатації космодрому, поліпшити стійкість роботи систем електропостачання і збільшити період експлуатації електрообладнання. У випадку виходу за допустимі межі показників якості електроенергії СКЯЕ дозволить вжити оперативних заходів по забезпеченню ЯЕ завдяки управлінню елементами системи електропостачання, це також дозволить підтвердити виконання вимог Замовника пускових послуг до електропостачання.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Линник А. К. Філософські аспекти розробки ракетно-космічної техніки [Електронний ресурс] / А. К. Линник // System design and analysis of aerospace technique characteristics. – 2021. – Т. 28, № 1. – С. 14–19. – Режим доступу: <https://doi.org/10.15421/472102>
- [2] Правила УРКТ-01.01 Розробка, виготовлення та експлуатація ракетно-космічної техніки. [Введені в дію наказом НКАУ від 12.12.2001р. №210] - 12 с.
- [3] Федоров О. П. Космічна техніка та технології. Енциклопедія Сучасної України. Київ: Інститут енциклопедичних досліджень НАН України . [Електронний ресурс]. – Режим доступу URL: <https://esu.com.ua/article-3846>.
- [4] Шевцов В. Ю. Технології проектування і конструювання техніки і технічних систем [Електронний ресурс] / В. Ю. Шевцов // System design and analysis of aerospace technique characteristics. – 2022. – Т. 26, № 1. – С. 63–70. – Режим доступу: <https://doi.org/10.15421/471909>
- [5] Володарський С.Т. Система моніторингу якості електричної енергії в децентралізованих системах електропостачання [Електронний ресурс] / С.Т. Володарський, А.В. Волошко // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2014. – №. 318 (69). – С. 10–18.
- [6] Abdel-Galil, T. Power quality disturbance classification using the inductive inference approach [Text] / T. Abdel-Galil, M. Kamel, A. M. Youssed // IEEE Trans. on Power Delivery. – 2004. – Vol. 19, №. 4. – P. 1812–1818.
- [7] He, H. A self-organizing learning array system for power Quality classification based on wavelet transform [Text] / H. He, J. A. Starzyk // IEEE Trans. on Power Delivery. – 2006. – Vol. 21, № 1. – P. 286–295.
- [8] Yang, H. T. A de-noising sheme for enhancing wavelet-based power quality monitoring system [Text] / H. T. Yang, L. Chung, C. C. Liao // IEEE on Power Delivery. – 2001. – Vol. 16, Issue 3. – P. 353–360
- [9] Гриб О. Г. Моніторинг споживання електроенергії з контролем якості / О. Г. Гриб, Д. А. Гапон, Т. С. Ієрусалімова, М. С. Белов, О. В. Лелека // Вісник Вінницького політехнічного інституту. - 2016. - № 2. - С. 39-44. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vvpi_2016_2_8
- [10] Coleman P. Power Quality Monitoring [Electronic resource] / Patrick Coleman // Electrical Engineering Handbook. – [S. l.], 2007. – Mode of access: <https://doi.org/10.1201/9781420009255.ch33>
- [11] Sinchuk I. O. Electricity quality control in the aspect of implementation of micro grid technology [Electronic resource] / I. O. Sinchuk, M. G. Kotyakova // Scientific notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series: Technical Sciences. – 2023. – Vol. 1, no. 2. – P. 288–292. – Mode of access: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.2.1/45>
- [12] Bunko V. Analysis of the use and implementation of the smart system for monitoring the electrical energy of the educational building [Electronic resource] / Vasyi Bunko, Oleksandr Kondrat, Nazarii Bunko // Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University. – 2024. – No. 4. – P. 169–176. – Mode of access: <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2024.4.22>
- [13] Приклад реалізації автоматизованої системи контролю та комерційного обліку електроенергії (АСКОЕ) [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.svaltera.ua/presscenter/articles/4379.php> – Назва з екрана
- [14] Системи обліку енергоспоживання і контролю технічного обслуговування [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://innovinnprom.com/galuzevi-rishennya/systemy-obliku-energospozhyvannya-i-kontrolyu-tehnichnogo-obslugovuvannya> – Назва з екрана
- [15] ДСТУ EN 50160:2023. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах

- загальної призначеності. – [На заміну ДСТУ EN 50160:2014; чинний від 2023-12-08] – Київ: Мінекономрозвитку України, 2023. – 27 с.
- [16] ДСТУ 3466-96. Якість електричної енергії терміни та визначення. – [Чинний від 1998-01-01] – Київ: НУВО «Енергокомплекс», 1996. – 15 с.
- [17] IEEE 1547:2003. Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power System. – [Valid from 2023-07-28], 2003. – 16 p.
- [18] Фролов В.П. Метод формування структур систем безперебійного електропостачання стартових комплексів ракет-носіїв на основі моделювання: дис.... канд. техн. наук : 05.07.06 / Фролов Віктор Петрович. - Харків: Нац. аерокосм. ун-т ім. М.С.Жуковського Харк. авіац. ін-т., 2010.- 171 с.
- [19] Electrical Power Systems Quality / H. Wayne Beaty [et al.]. – 2nd ed. – [S. l.]: McGraw-Hill Professional, 2002. – 528 p.
- [20] Power Quality Harmonics Analysis and Real Measurements Data [Electronic resource] / ed. by G. Romero. – [S. l.]: InTech, 2011. – Mode of access: <https://doi.org/10.5772/699>
- [21] Janik P. Influence of increasing numbers of RE-inverters on the power quality in the distribution grids: A PQ case study of a representative wind turbine and photovoltaic system [Electronic resource] / Przemyslaw Janik, Grzegorz Kosobudzki, Harald Schwarz // *Frontiers in Energy*. – 2017. – Vol. 11, no. 2. – P. 155–167. – Mode of access: <https://doi.org/10.1007/s11708-017-0469-3>
- [22] Pivnyak G. Assessment of power supply energy efficiency by voltage quality criterion [Electronic resource] / G. Pivnyak et al. // *Rynek Energii*. – 2021. – No. 4(155). P. 75-84. ISSN 14255960.
- [23] El Hajji M. The electromagnetic interference caused by high voltage power lines along the electrical railway equipment [Electronic resource] / Moine El Hajji, Hassane Mahmoudi, Moussa Labbadi // *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*. – 2020. – Vol. 10, no. 5. – P. 4581. – Mode of access: <https://doi.org/10.11591/ijece.v10i5.pp4581-4591>
- [24] Stones J. Power quality [Electronic resource] / J. Stones, A. Collinson // *Power Engineering Journal*. – 2001. – Vol. 15, no. 2. – P. 58–64. – Mode of access: <https://doi.org/10.1049/pe:20010201>
- [25] Voltage sag analysis case studies [Electronic resource] / J. Lamoree [et al.] // *IEEE Transactions on Industry Applications*. – 1994. – Vol. 30, no. 4. – P. 1083–1089. – Mode of access: <https://doi.org/10.1109/28.297926>
- [26] Bollen M. H. J. Voltage sags: effects, mitigation and prediction [Electronic resource] / M. H. J. Bollen // *Power Engineering Journal*. – 1996. – Vol. 10, no. 3. – P. 129–135. – Mode of access: <https://doi.org/10.1049/pe:19960304>

Надійшла (Received) 13.01.2025

Прійнята (Accepted) 11.02.2025

Опублікована (Published) 30.04.2025

FEATURES OF THE CREATION OF ELECTRIC POWER QUALITY CONTROL SYSTEMS IN POWER SUPPLY SYSTEMS OF SPACE ROCKET COMPLEXES

- REVA V.S. Postgraduate Student, Head of the group, «Yuzhnoye» SDO, Krivorizska street, 3, Dnipro, Ukraine, 49008, e-mail: reva.vad@ukr.net, ORCID: 0000-0000-0000-0000;
- LYSENKO O.G. Ph.D. technical Sciences, associate professor, associate professor of the electric drive department engineering of the Dnipro University of Technology, Dmytro Yavornytskyi Avenue, 19, Dnipro, Ukraine, e-mail: lysenkoag@ukr.net, ORCID: 0000-0002-7041-671X.
- UDOVYK O.V. Postgraduate student of the Department of electric power engineering of the of the Dnipro University of Technology, Dmytro Yavornytskyi Avenue, 19, Dnipro, Ukraine, e-mail: udovyk.o.v@nmu.one, ORCID: 0009-0002-1000-7815.

Purpose. Solution of electric power quality issues at space rocket complexes during the execution of launch preparation and launch cycles for the space rocket through the creation and solution of the electric power quality control system (EPQCS) as a separate structure within the power supply system of space rocket complexes PSS SRC with the provision of specified power parameters.

Methodology. Review of literary sources on the subject, method of expert evaluations, method of system analysis, method of experimental research.

Findings. Indicators of electricity quality, which are the most important for SRC electricity consumers, and which must be monitored, are given. The main requirements to EPQCS have been determined. In case of exceeding the permissible limits of electricity power quality indicators, EPQCS will allow to take operational measures necessary to counter off-nominal situations, by using to the management of the elements of the power supply system. Information security was carried out using a routinely adopted structural block diagram of such systems, on the basis of which the three-tier structure of the EPQCS was implemented. The algorithm and basic principles of the operation of the EPQCS in the nominal mode and the mode beyond the limits of the power quality indicators (PQI) are reviewed. A short

description of the structure, as well as an example of the algorithm for managing the EPQCS subordinates, has been included.

Originality. The task of a comprehensive approach to electricity power quality indicators was solved and created electric power quality control system in the SRC power supply systems. Microprocessor control means primarily provide speed in comparison with similar systems based on analog-to-digital converters. The proposed EPQCS carries out electricity quality control with the display of data on the operator's screen in real time, continuous monitoring with fixation and registration of the main parameters, as well as notification of the operator in case off-nominal situations.

Practical value. Developed, manufactured and successfully passed all types of tests of the electric power quality control system for the SRC «Cyclone -4» (Brazil), and partly for the SRC «Cyclone -4M» (Canada).

Keywords: quality, electric power, power supply system, control, structure, consumer, principle of operation.

REFERENCES

- [1] Linnyk A. K. (2021). Filosofski aspektu rozrobku raketno-kosmichnoi tekhniki (Philosophical aspects of the development of rocket and space technology) [Electronic resource]. *System design and analysis of aerospace technique characteristics*. Vol. 28, No. 1. 14–19. Access mode: <https://doi.org/10.15421/472102>
- [2] Pravyla URKT-01.01 Rozrobka, vygotovlennya ta ekspluatatsiya raketno-kosmichnoi tekhniki (Rules URKT-01.01 Development, manufacture and operation of rocket and space technology). [Put into effect by the order of the NKAU dated 12.12.2001 №210]. – 12 p.
- [3] Fedorov O.P. (2014). Kosmichna tekhnika ta tekhnologii. Encyklopediya Suchasni Ukrainy. Kyiv: Institut Encyklopedicheskikh doslidzen NAN Ukrainy (Space engineering and technologies. Encyclopedia of Modern Ukraine. Kyiv: Institute of Encyclopedic Research of the National Academy of Sciences of Ukraine). URL: <https://esu.com.ua/article-3846>.
- [4] Shevtsov V. Yu. (2022). Tehnologysya proektuvannya I konstruyuvannya tehniky I tehnicnyh system. Systemne proektuvannya ta analiz harakterystyk aerokosmichnoi tehniky. (Technologies of design and construction of equipment and technical systems) [Electronic resource]. *System design and analysis of aerospace technique characteristics*. Vol. 26, No. 1, 63–70. Access mode: <https://doi.org/10.15421/471909>
- [5] Volodarsky E.T. (2014). Systema monitoringu yakosti elektrychnoi energii u decentralizovanykh systemach electropostachannya (Electric energy quality monitoring system in decentralized power supply systems) [Electronic resource]. *Eastern European Journal of Advanced Technologies*. No. 318 (69), 10–18.
- [6] Abdel-Galil, T., Kamel M., Youssed A. M. (2004). Power quality disturbance classification using the inductive inference approach [Text]. *IEEE Trans. on Power Delivery*. Vol. 19, No. 4. 1812–1818.
- [7] He, H., Starzyk, J. A. (2006). A self-organizing learning array system for power Quality classification based on wavelet transform [Text]. *IEEE Trans. on Power Delivery*. Vol. 21, No 1, 286–295.
- [8] Yang, H. T., Chung, L., Liao, C. C. (2001). A denoising scheme for enhancing wavelet-based power quality monitoring system [Text]. *IEEE on Power Delivery*. Vol. 16, Issue 3, 353–360.
- [9] Hryb O. G., Gapon D. A., Ierusalimova T. S., Belov M. S., Leleka O. V. (2016). Monitoring spogivannya elektroenergii z kontrolem yakosti (Monitoring of electricity consumption with quality control). *Bulletin of Vinnytsia Polytechnic Institute*. No. 2, P. 39-44. Access mode: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vvpi_2016_2_8
- [10] Coleman P. (2007). Power Quality Monitoring [Electronic resource]. *Electrical Engineering Handbook*. Mode of access: <https://doi.org/10.1201/9781420009255.ch33>
- [11] Sinchuk I. O., Kotyakova M. G. (2023). Electricity quality control in the aspect of implementation of micro grid technology [Electronic resource]. *Scientific notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series: Technical Sciences*. Vol. 1, No. 2, 288–292. Mode of access: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.2.1/45>
- [12] Bunko V., Kondrat O., Bunko N. (2024). Analysis of the use and implementation of the smart system for monitoring the electrical energy of the educational building [Electronic resource]. *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*. No. 4, 169–176. Mode of access: <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2024.4.22>
- [13] An example of implementing an automated system for monitoring and commercial accounting of electricity (ASKOE) [Electronic resource] – Access mode: <https://www.svaltera.ua/presscenter/articles/4379.php> – Screen title
- [14] Energy consumption accounting and maintenance control systems [Electronic resource] – Access mode: <https://innovinnprom.com/galuzevirishennya/systemy-obliku-energospozhyvannya-i-kontrolyu-tehnicnogo-obslugovuvannya> – Screen title
- [15] DSTU EN 50160:2023 Harakterystyky naprugy electropostaczannya v mererzakh zagalnogo pryznaczennya. – [Replaces DSTU EN 50160:2014; valid from 1998-01-01] – Kyiv, Minekonomrozvytku Ukrainy. (Characteristics of

- power supply voltage in general purpose electrical networks, Kyiv, Ministry of Economic Development of Ukraine), 27p.
- [16] DSTU 3466-96 Yakist elektrychnoi energii terminy ta vyznachennya. – [Valid from 1998-01-01] – Kyiv NUVO "Energokompleks" (Quality of electrical energy, terms and definitions, Kyiv, NUVO "Energokompleks"), 15p.
- [17] IEEE 1547:2003. Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power System. – [Valid from 2023-07-28], 2003. – 16 p.
- [18] Frolov V.P. Metod formuvannya struktur system bezperebinogo elektropostachannya startovyh kompleksiv raket-nosiiv na osnovi matematychnogo moduluvannya: dys... kand. techn. nauk: 05.07.06 (The method of forming the structures of uninterrupted power supply systems of launch complexes based on modeling: diss. Ph.D. technical of science: 05.07.06)/ Kharkiv: Nac. Aerokosm. Un-t. im. N.E. Gukovskogo Khark. aviac. In-t. 171p.
- [19] H. Wayne Beaty. (2002). Electrical Power Systems Quality. [S. l.]: McGraw-Hill Professional, 528.
- [20] Romero G. (2011). Power Quality Harmonics Analysis and Real Measurements Data [Electronic resource]. InTech, Mode of access: <https://doi.org/10.5772/699>
- [21] Janik P. Kosobudzki G, Schwarz H. (2017). Influence of increasing numbers of RE-inverters on the power quality in the distribution grids: A PQ case study of a representative wind turbine and photovoltaic system [Electronic resource]. *Frontiers in Energy*. Vol. 11, No. 2, 155–167. Mode of access: <https://doi.org/10.1007/s11708-017-0469-3>
- [22] Pivnyak G. Assessment of power supply energy efficiency by voltage quality criterion [Electronic resource] / G. Pivnyak et al. // *Rynek Energii*. – 2021. – No. 4(155). P. 75-84. ISSN 14255960.
- [23] El Hajji M., Mahmoudi H., Labbadi M. (2020). The electromagnetic interference caused by high voltage power lines along the electrical railway equipment [Electronic resource]. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*. Vol. 10, No. 5, 45-81. Mode of access: <https://doi.org/10.11591/ijece.v10i5.pp4581-4591>
- [24] Stones J., Collinson A., (2001). Power quality [Electronic resource]. *Power Engineering Journal*. Vol. 15, No. 2, 58–64. Mode of access: <https://doi.org/10.1049/pe:20010201>
- [25] J. Lamoree. (1994). Voltage sag analysis case studies [Electronic resource]. *IEEE Transactions on Industry Applications*. Vol. 30, No. 4, 1083–1089. Mode of access: <https://doi.org/10.1109/28.297926>
- [26] Bollen M. H. J. (1996). Voltage sags: effects, mitigation and prediction [Electronic resource]. *Power Engineering Journal*. Vol. 10, No. 3, 129–135. Mode of access: <https://doi.org/10.1049/pe:19960304>

УДК 621.316.13

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОТОКОРОЗПОДІЛУ В МІКРОМЕРЕЖІ З РОЗОСЕРЕДЖЕНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

- ОЛІЙНИЧЕНКО М. Ю. аспірант кафедри електротехніки Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського, Кременчук, Україна, e-mail: oliynichenko@kdu.edu.ua; ORCID: 0000-0001-6651-0175
- БЯЛОБРЖЕСЬКИЙ О.В. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електротехніки Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського, Кременчук, Україна, e-mail: bialobrzieski@ukr.net; ORCID: 0000-0003-1669-4580
- ПОСТІЛ А. О. аспірант кафедри електротехніки Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського, Кременчук, Україна, e-mail: artur_postil@kdu.edu.ua; ORCID: 0000-0001-9411-7047

Мета роботи. Оцінка потокорозподілу мікромережі з автономними джерелами для виявлення впливу рівнів потужності на рівень частоти та напруги.

Методи дослідження. Проведений аналіз існуючих досліджень в галузі електроенергетики в частині задач керування потоками потужності мікромереж з автономними генеруючими установками малої та середньої потужності. В результаті аналізу встановлено що актуальним завданням є контроль та керування потоками активної та реактивної потужності в мікромережах для підтримки частоти та діючого значення напруги мікромережі на заданому рівні. Відзначено, що зазначене питання має певну складність зважаючи на нестабільність потоків первинної енергії альтернативних джерел, який може призвести як до дефіциту так і до надлишку енергії. На підставі теоретичних основ електротехніки, з використанням методів та прийомів використовуваних в розрахунках систем електропостачання на підставі структури системи електропостачання невеликого аграрного підприємства створено імітаційну модель з альтернативними джерелами електричної енергії.

Отримані результати. В пакеті візуального програмування Simulink/Matlab побудовано імітаційну модель яка дозволяє провести дослідження розподілу активної та реактивної потужності у вузлах мережі та контролювати зміни частоти та діючого значення напруги в них. В ході дослідження поставлено декілька експериментів з певним розподілом активної та реактивної потужності між споживачами та генеруючими установками в мікромережі за умов паралельної та автономної роботи. В результаті проведення експерименту з відмиканням зовнішньої мережі, змінами рівня навантаження, відзначені більші коливання напруги та перерозподіл реактивної потужності між споживачами і генеруючими установками. Це явище викликано зокрема формування активної та реактивної потужностей у блоці динамічного навантаження, розрахунок в якому пов'язаний з базовим рівнем напруги та частоти.

Наукова новизна. В результаті узагальнення отриманих часових діаграм виявлено, що розрахунок активної та реактивної потужностей, як навантажень так і генеруючих установок необхідно виконувати з урахуванням поточного значення частоти та рівня напруги у вузлі спостереження відносно базових.

Практична цінність. Отримані результати слід приймати до уваги в ході реалізації систем керування автономними джерелами електричної енергії, а саме методів розрахунку поточних контрольованих значень активної та реактивної потужностей.

Ключові слова: активна потужність; реактивна потужність; баланс; частота; напруга..

I. ВСТУП

Зростаюче використання альтернативних джерел джерел електроенергії є важливою складовою в напрямку розвитку сучасної світової енергетики [1]. В Україні в зв'язку з руйнуванням вузлових підстанцій високої напруги системи електропостачання спостерігається зріст інтересу до будівництва розосереджених джерел генерації електроенергії на основі альтернативних джерел енергії [2].

Тим часом насичення розподільних мереж

альтернативними джерелами електроенергії потребує вирішення низки проблем, які виникають через непостійність і не передбачуваність рівня генерації зазначених джерел внаслідок зміни умов роботи вітрової енергетичної установки, або зміни рівня генерації сонячної електростанції, що спричиняє неконтрольовану зміну генерації в мікромережі. Зміна рівня генерації потужності в автономному режимі роботи мікромережі спричиняє зміну частоти, рівня балансу активної та реактивної потужностей, що потребує окремого контролю та керування для

підтримки необхідного рівня балансу активної та реактивної потужностей.

II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

В роботі [3] контролюється зміна частоти мережі в автономній роботі мікромережі, що досягається використанням системи зберігання енергії, яка підтримує балансу активної потужності. Зазначено, що пікове відхилення частоти в пропонованому рішенні не перевищує 0,07 Гц. Питання використання систем зберігання енергії розвивається в роботі [4]. Основну увагу приділяють оптимальній ємності системи зберігання енергії для покриття пікових навантажень при зменшеній генерації та накопичуванні при пониженому споживанні енергії. Увага також приділяється контролю частотно-реактивної генерації потужності, або споживання системи зберігання енергії для підтримання балансу потужностей в мікромережі [5].

Керування зміною частоти мікромережі в автономному режимі досліджується в роботі [6], де застосовується ПІ-контролер з нейромережним алгоритмом для регулювання генерації енергії синхронного генератора. Використання штучних нейронних мереж у ПІ-контролері для врахування нелінійних факторів мікромережі та оптимального керування генерацією синхронного двигуна [7] дозволяє суттєво підвищити якість процесу генерації, але при цьому автори розглядають систему з одною генеруючою установкою.

Питання керування активною потужністю синхронного двигуна розвивається в роботах [8] та [9], де застосовуються ПІ-контролери з алгоритмами Mayfly та Коати відповідно. Окрему увагу приділено керуванню генерацією реактивної потужності машиною, що здійснюється адаптивним ПІ-контролером на основі оцінки параметрів кожної гілки мікромережі [10].

Керування активною потужністю вітрової енергоустановки на основі алгоритму оптимізації «польоту комарів», що спрямоване на мінімізацію частотних коливань у мікромережі, аналізується в роботі [11]. Увага також приділяється керуванню мікромережею з сонячною панеллю та системою зберігання енергії, які підключені до інвертора для регулювання активної та реактивної потужності за оптимальним алгоритмом [12].

Деякі дослідники визначають зв'язок рівняння прямого спаду реактивної потужності від напруги, та активної потужності від частоти [13], при цьому відзначають необхідність покращення співвідношенням X/R , так як для мережі з високим співвідношенням X/R посилюється зв'язок між активною та реактивною потужністю. В роботі [14] розглядається покращений метод який використовує термін компенсації для мінімізації внутрішньої помилки розподілу реактивної потужності без будь

якої потреби в обміні інформації між блоками генерації. Пропонується проста система компенсації для ефективного виявлення зміни навантаження в ізольованій мікромережі.

З аналізу наведених робіт випливає, що проблема пов'язана з балансом активної та реактивної потужності в мережі відома і автори розглядають різні варіанти генеруючих установок і варіанти керування генерацією в мікромережі різними алгоритмами. Як вкрай актуальне завдання для мікромереж розглядаються задачі регулювання активної та реактивної потужностей у зв'язку із рівнями частоти та напруги.

III. МЕТА РОБОТИ

Оцінка режимів поточкорозподілу мікромережі з розосередженими джерелами для виявлення впливу рівнів потужності на рівень частоти та напруги.

IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГУ МАТЕРІАЛУ І АНАЛІЗ ОТРИМАННИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Для досягнення зазначеної мети обмежимо структуру мікромережі з альтернативними джерелами енергії, такими як сонячна електростанція, вітрова енергетична установка, дизельний генераторна установка та система зберігання енергії. У якості прикладу розглянемо електротехнічний комплекс птахофабрики. Птахофабрика складається з наступних об'єктів: 1) пташник на 36000 кур; 2) 3) пташники на 4160 кур; 4) зерносклад; 5) яйцесклад; 6) офіс; 7) магазин. Необхідно спочатку провести розрахунок електричних навантажень об'єкту. Основні ймовірні навантаження на птахофабриці зведені в таблицю 1.

Таблиця 1. Зведені ймовірні потужності об'єктів розташованих на птахофабриці

Шифр	Назва об'єкту	$P_{д}$, кВт	$\cos\phi$
CF1	Пташник 36000 кур	120	0,75
CF2	Пташник 4160 кур	20	0,75
CF3	Пташник 4160 кур	20	0,75
GW4	Зерносклад	5	0,7
EW5	Яйцесклад	10	0,7
OE	Офіс	15	0,85
MT	Магазин	2	0,85
LH	Вуличне освітлення	0	0,55

Розраховано повну, та реактивну потужність гілок навантаження з врахуванням параметрів дротів лінії, а саме активного та реактивного опору з падінням напруги на лінії. Отримані результати зведено в таблиці 2

Таблиця 2. Параметри гілок навантаження

Ділянка мережі	S, кВА	P, кВт	Q, кВАр	cosφ	l, км	r _{лф} , Ом	x _{лф} , Ом	ΔU, %
Гілка 1								
0-1	160	120	105,83	0,75	0,054	0,032	0,019	4,05
Гілка 2								
0-2	27,39	20	18,725	0,73	0,0214	0,024	0,0075	0,33
2-3	26,6	20	17,63	0,75	0,045	0,051	0,016	0,89
2-4	14,28	10	10,2	0,7	0,0533	0,061	0,018	0,71
4-5	7,1	5	5,1	0,7	0,0627	0,071	0,022	0,32
Гілка 3								
0-6	25,31	20	15,52	0,79	0,0567	0,065	0,02	1,6
6-7	26,6	20	17,63	0,75	0,0333	0,066	0,011	0,66
6-8	17,64	15	9,29	0,85	0,052	0,059	0,018	0,76
8-9	2,35	2	1,23	0,85	0,057	0,065	0,02	0,1

Характерною особливістю встановленого режиму роботи мікромережі є одночасність процесів генерації та споживання однієї і тієї ж кількості потужностей. У будь-який момент встановленого режиму роботи мікромережі загальна потужність, вироблена генеруючими установками, рівна загальній споживаній потужності в цей же момент часу. Таке співвідношення виробленої та споживаної потужності називається балансом активної потужності [15].

Рівняння балансу активної потужності для мікромережі має вигляд

$$\sum P_{\Pi} = \sum P_{Г} = \sum P_{Н} + \Delta P_{\Sigma} \quad (1)$$

де $\sum P_{Г}$ - загальна генерована активна потужність в мікромережу, з урахуванням активної потужності, отриманої з сусідніх мікромереж; $\sum P_{Н}$ - загальна потужність споживачів в мікромережі, з урахуванням активної потужності, яка передається в сусідню мікромережу; ΔP_{Σ} - загальні втрати активної потужності;

Величина загальної активної потужності споживачів при експлуатаційних розрахунках визначається підсумком максимальних потужностей вузлів навантажень з врахуванням коефіцієнту різночасності максимумів.

При проектуванні мікромережі з альтернативними джерелами енергії величина загальної активної потужності є не постійною і ріст навантажень в мікромережі не передбачається. Можливо поділити режими роботи мікромережі на 3 випадки:

1) якщо споживання мікромережі здійснюється з зовнішньої мережі зазвичай не виникає проблем з балансуванням активної потужності, частота в мікромережі незмінна;

2) якщо в мікромережі знаходяться генеруючі установки і зовнішня мережа підключена паралельно,

то в такому випадку також існує можливість виникнення небалансу потужностей, але малоімовірна, тому що зовнішня мережа може як споживати надлишок згенерованої потужності так і покрити дефіцит потужності, частота в мікромережі також незмінна;

3) якщо мікромережа працює автономно то з умовою забезпечення балансу потужностей частота мікромережі залишається стабільною і визначається режимами машин та перетворювачів. Будь-яке відхилення у виробництві або споживанні енергії викликає зміни частоти мікромережі, що вимагає регулювання як генерації так і споживання потужності для стабілізації зазначеного параметру. Для виконання балансу потужностей раціонально зменшити генерацію, або припинити її. Якщо вимкати генеруючу установку не можливо, то надлишок енергії можна направити до системи зберігання енергії.

Баланс реактивної потужності. Іншою характерною особливістю встановленого режиму роботи мікромережі є одночасність процесів генерації і споживання потужності. Відповідно в установленому режимі роботи мікромережі в кожен момент часу виконується баланс як активної так і реактивної потужності.

За аналогією з рівнем балансу активної потужності діє баланс реактивної:

$$\sum Q_{\Pi} = \sum Q_{Г} = \sum Q_{Н} + \Delta Q_{\Sigma} \quad (2)$$

де $\sum Q_{Г}$ - загальна генерована реактивна потужність в мікромережі, з урахуванням активної потужності, отриману з сусідніх мікромереж; $\sum Q_{Н}$ - загальна потужність споживачів в мікромережі, з урахуванням реактивної потужності яка передається в сусідню мікромережу; ΔQ_{Σ} - загальні втрати реактивної потужності.

Генерація реактивної потужності відбувається не тільки генераторами, а може й спеціально

встановленими в мікромережі джерелами реактивної потужності такими як компенсуючі пристрої. До компенсуючих пристроїв входять: конденсаторні батареї; реактори; синхронні компенсатори; синхронні генератори; активні фільтри або інвертори які встановлені на генеруючих установках, за умов наявності таких функціональних можливостей в силовій частині та системі керування. Тоді рівняння балансу реактивної потужності буде в наступному виді:

$$\sum Q_{\Pi} = \sum Q_{EC} + \sum Q_K = \sum Q_H + \Delta Q_{\Sigma} \quad (3)$$

де $\sum Q_{EC}$ - загальна реактивна потужність, генерована генераторами, враховуючи реактивну потужність споживану з загальної мережі; $\sum Q_K$ - загальна реактивна потужність компенсуючого пристрою.

Баланс реактивної потужності розраховується зазвичай для режиму з найбільшим навантаженням. Реактивна потужність, що виробляється генераторами мікромережі визначається їх навантаженням активною потужністю та коефіцієнтом потужності, номінальне значення якого становить 0,8...0,9. Генератори є основними джерелами реактивної потужності та виробляють близько 60% необхідної в мікромережі реактивної потужності.

В мікромережі, що розглядається пропонуються наступні типи генеруючих установок: сонячна електростанція; інверторно акумуляторна система зберігання енергії; дизельний генератор на базі синхронної машини; вітрова енергетична установка на базі асинхронного генератора з подвійним живленням.

В структурі споживачів птахофабрики застосовуються асинхронні двигуни. Тому розглянемо порядок визначення активної та реактивної потужності на прикладі схеми заміщення (рис.1) для асинхронного двигуна з [16]:

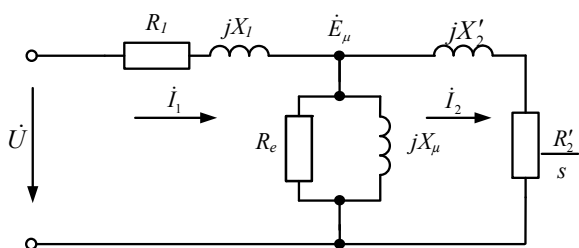


Рисунок 1. Схема заміщення асинхронного двигуна

Визначаємо активну потужність фази схеми заміщення асинхронного двигуна:

$$P_s = P_{R_1} + P'_{R_2} + P_{R_\mu} \quad (4)$$

Активна потужність статора, ротора, магнітного кола схеми заміщення асинхронного двигуна:

$$P_{R_1} = I_1^2 \cdot R_1, P_{R'_2} = I_2'^2 \cdot \frac{R'_2}{s}, P_{R_\mu} = \frac{E_\mu^2}{R_\mu}, \quad (5)$$

де R_1 - активний опір обмотки статора; R'_2 - приведений активний опір обмотки ротора; s - ковзання; R_μ - еквівалентний активний опір магнітного кола; I_1 - діюче значення струму статора; I_2' - діюче значення приведенного до статора струму ротора; E_μ - діюче значення ЕРС, індукована в колі намагнічування.

Визначаємо реактивну потужність кіл схеми заміщення асинхронного двигуна:

$$Q_s = Q_{X_1} + Q'_{X_2} + Q_{X_\mu}, \quad (6)$$

Реактивна потужність статора, ротора, магнітного кола схеми заміщення асинхронного двигуна:

$$Q_{X_1} = I_1^2 \cdot X_1, Q_{X'_2} = I_2'^2 \cdot X'_2, Q_{X_\mu} = \frac{E_\mu^2}{X_\mu} \quad (7)$$

де X_1 - реактивний опір обмотки статора; X'_2 - приведений реактивний опір обмотки ротора; X_μ - еквівалентний реактивний опір магнітного кола.

Так як головною різницею між асинхронним двигуном та асинхронним генератором є те, що ковзання для генераторного режиму приймається $s < 0$ [16]. Наведений розрахунок потужностей для асинхронного генератора буде аналогічним.

Для вітро енергетичної установки можливий альтернативний варіант такий як синхронного генератор. В цій роботі синхронний генератор розглядається в парі з дизельним двигуном та вітроенергетичною установкою. Тому також потрібно визначити параметри режиму регулювання активної та реактивної потужностей з урахуванням схем заміщення. Розглянемо питання регулювання збудження синхронної машини [17].

Регулювання напруги й реактивної потужності є важливим як з технічної, так і з економічної точки зору, оскільки воно враховує особливості процесів генерації та розподілу електроенергії. Рівень напруги, який задається збудженням синхронних генераторів, відрізняється за величиною та фазою в різних точках енергосистеми. Ця різниця напруг є ключовим фактором для забезпечення передачі електроенергії. Напруга \dot{U}_L , на початку лінії мікромережі (рис. 2),

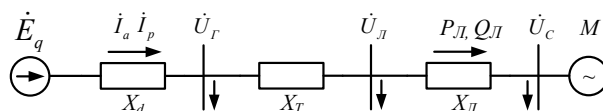


Рисунок 2. Схема передачі електроенергії в мікромережі з синхронним генератором

яка формується генераторними установками, не

збігається з напругою \dot{U}_c у вузлах системи мікромережі, і ця невідповідність $\Delta\dot{U}$ залежить від активної P_L та реактивної Q_L потужностей, що передаються через лінію.

Регулювання напруги та реактивної потужності забезпечується регулюванням збудження синхронних генераторів. Струм збудження генератора визначає його ЕРС, напругу генератора та напругу лінії які зв'язані між собою співвідношенням напруги у вузлі. Формула напруги у вузлі навантаження \dot{U}_L :

$$\begin{aligned}\dot{U}_L &= \dot{U}_c + \Delta\dot{U} = \dot{U}_c + \frac{Q_L}{U_c X_L} + j \frac{P_L}{U_c X_L} = \\ &= U_c + \dot{I}_p X_L + j \dot{I}_a X_L\end{aligned}\quad (8)$$

де X_T - реактивний опір трансформатора; X_L - реактивний опір лінії передачі.

Формула для активної потужності синхронного генератора:

$$P = \frac{U_L U_c}{X_L} \sin \delta_L;\quad (9)$$

де δ - кут між векторами ЕРС та напругою генератора $\delta = (\vec{E}_q, \vec{U}_c)$.

При відсутності регулювання збудження ЕРС $E_q = \text{const}$. Реактивна потужність генератора:

$$Q_G = Q_{E_q} \frac{E_q U_c}{X_d + X_c} \cos \delta - \frac{U_c^2}{X_d + X_c}\quad (10)$$

де $X_c = X_T + X_L$ - реактивний опір системи.

Активна потужність генератора визначається статичною характеристикою яка показує залежність активної потужності від кута навантаження δ .

Активна потужність на стороні вищої напруги, визначають з виразу:

$$P_G = P_{E_q} = \frac{E_q U_c}{X_d + X_c} \sin \delta,\quad (11)$$

Активній потужності відповідає певна реактивна потужність. При допущенні $Q_G = Q_L$ напруги U_c , можливо отримати залежність $Q_G = f(P_G)$. Для кута $\delta = \frac{\pi}{2}$ така залежність являє собою рівняння повної потужності:

$$\left(Q_G - U_G^2 \frac{X_d - X_c}{2X_d X_c} \right)^2 + P_G^2 = \left(U_G^2 \frac{X_d + X_c}{2X_d X_c} \right)^2,\quad (12)$$

При автоматичному регулюванні, що забезпечує незмінність потокозчеплення обмотки збудження, вважається незмінною перехідна ЕРС генератора $E' = \text{const}$. Активна потужність при цьому:

$$P_{E'} = \frac{E' U_c \sin \delta}{(X'_d + X_c)} - \frac{U_c^2 (X_d - X'_d) \sin 2\delta}{2(X'_d + X_c)(X'_d + X_c)},\quad (13)$$

$$P_{U_r} = \frac{U_r U_c}{X_c} \sin 2\delta - \frac{U_c^2 (X_d - X'_d)}{2(X'_d + X_c)(X'_d + X_c)} \sin 2\delta,\quad (14)$$

На основі визначених раніше даних для дослідження розподілу активної та реактивної потужності в гібридній мікромережі на основі електротехнічного комплексу птахофабрики з використанням відомих підсистем розроблено модель (рис 3) [18]. Модель складається з блоку мережі (Grid) номінального потужністю $S = 850$ кВА та напругою $U = 10$ кВ і частотою мережі $f = 50$ Гц; трансформатора (TR) з номінальною потужністю $S = 250$ кВА, вищою напругою $U_1 = 10$ кВ та нижчою напругою $U_2 = 400$ В; вимикача (BR); активного та реактивного опору дротів першої гілки споживачів (0-1) параметри дротів вказані в таблиці 2; пташник (CF1) з номінальною активною потужністю $P = 120$ кВт та реактивною потужністю $Q = 105,83$ кВАр, номінальною напругою $U = 400$ В; дизельного генератора (DG) з номінальною генерованою потужністю $P = 50$ кВт та номінальною напругою $U = 400$ В; системи збереження енергії (ES) з номінальною генерованою потужністю $P = 100$ кВт та номінальною напругою $U = 400$ В. Активного та індуктивного опору дротів другої гілки споживачів (0-2), підсистема якої наведена на рис. 4 (ВН 2), яка містить активні та реактивні опори дротів (2-3, 2-4, 4-5), які ведуть до пташника (CF2) з номінальною активною потужністю $P = 20$ кВт та $Q = 17,63$ кВАр, напругою $U = 400$ В; яйцескладу (EW) з номінальною активною потужністю $P = 10$ кВт та реактивною потужністю $Q = 10,2$ кВАр, напругою $U = 400$ В; зернокладу (GW) з номінальною активною потужністю $P = 5$ кВт та реактивною потужністю $Q = 5,1$ кВАр, напругою $U = 400$ В. До лінії приєднано генеруючу вітрову енергоустановку (WT) з номінальною генерованою активною потужністю $P = 50$ кВт та напругою $U = 400$ В, з урахуванням активного опору та реактивного опору дротів до вітрової енергетичної установки (WW). Опору дротів третьої гілки споживачів (0-6) підсистема якої (ВН 3) наведено на рис.5, яка містить активні та реактивні опори дротів ділянок (6-7, 6-8, 8-9), які ведуть до пташника (CF3) з номінальною активною потужністю $P = 20$ кВт та реактивною потужністю $Q = 17,63$ кВАр, напругою $U = 400$ В; офісу (OE) з номінальною активною потужністю $P = 15$ кВт та реактивною потужністю $Q = 9,29$ кВАр, напругою $U = 400$ В, магазину (MT) з номінальною активною потужністю $P = 2$ кВт та реактивною потужністю $Q = 1,23$ кВАр, напругою $U = 400$ В. До лінії приєднано генеруючу сонячну установку (SA) з номінальною генерованою потужністю $P = 120$ кВт та напругою $U = 400$ В, та вуличним освітленням птахофабрики (LT 500 W). Для керування споживанням та генерацією енергії використовуються блоки будови сигналу (Signal Builder) для дискретної зміни в часі блоки одиничної східчастої дії (Step).

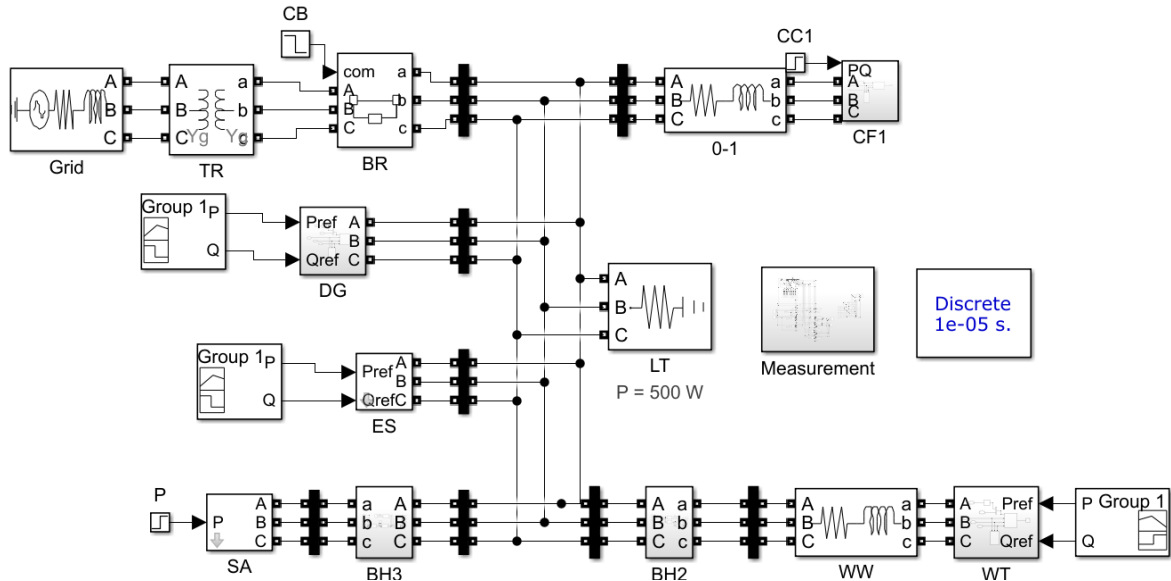


Рисунок 3. Гібридна мікромережа з паралельним під'єднанням до зовнішньої мережі

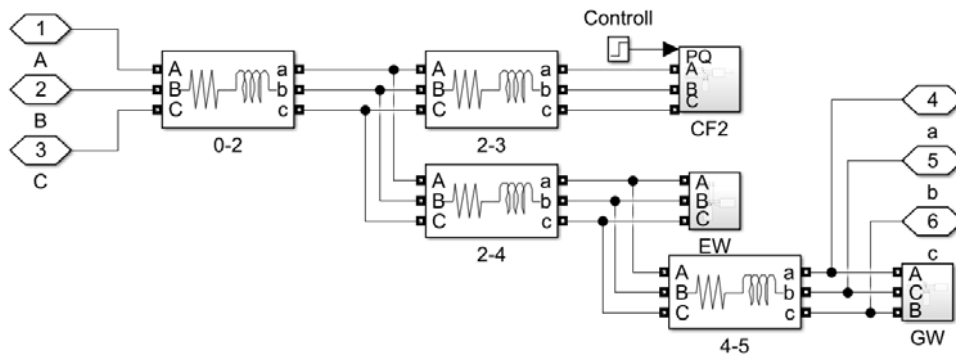


Рисунок 4. Підсистема гілки споживачів 2 (ВН 2)

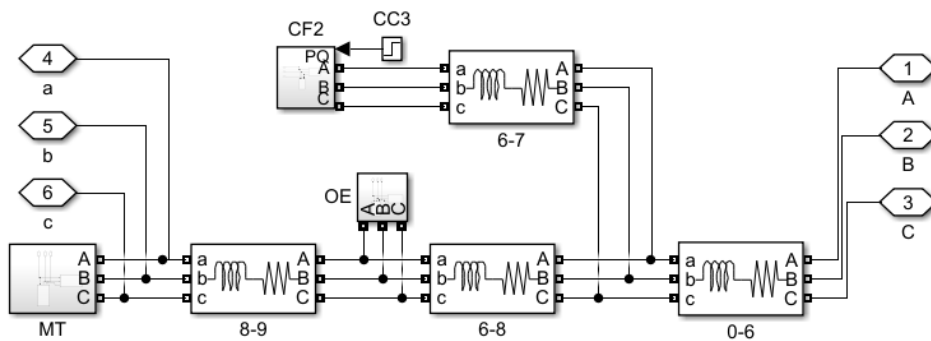
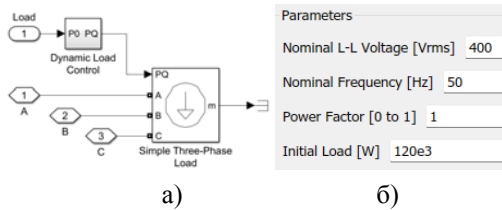


Рисунок 5. Підсистема гілки споживачів 3 (ВН 3)

В моделі використовуються блоки для формування заданого значення і регулювання активної та реактивної потужності в мікромережі. Така підсистема наведена на рисунку 6, а, на рисунку 6, б відображені параметри за якими блок виконує розрахунки струмів на підставі активної та реактивної потужностей. Номінальна напруга $V_{rms}=400$ В,

частота мережі $f=50$ Гц, коефіцієнт потужності $Power\ Factor=1$, початкове значення потужності яке блок буде формувати в початковий момент часу розрахунку $Initial\ Load=120$ кВт.

Для дослідження змін частоти та діючого значення напруги зі струмом в мікромережі виконаємо серію експериментів.



а)

б)

Рисунок 6. Блок формування активної та реактивної потужності: а) підсистема б) параметри налаштування блоку

Експеримент сформуємо для паралельної роботи із зовнішньою мережею та автономної роботи. Прийемо до уваги ймовірну зміну навантаження, а також зміни генерації джерел, які використовують природні первинні джерела енергії: енергію вітру та енергію сонця. Окрім того будемо враховувати, що деякі джерела, які використовують інверторно/випрямні перетворювачі здатні також забезпечити реактивну потужність як ємнісного так і індуктивного характеру.

Експеримент формуємо наступним чином: експеримент проводиться при мінімальному споживанні потужностей споживачами ($P_{BH1}=20$ кВт; $P_{BH2}=17$ кВт; $P_{BH3}=19$ кВт) та відімкненні мікромережі, на 0.3 с. з генеруючих установок працює лише сонячна електростанція, дизельний генератор та вітрова енергетична установка відімкненні, системи зберігання енергії споживають надлишок активної потужності $P_{ES}=39037$ Вт, та відбувається генерація реактивної потужності інвертором системи зберігання

$Q_{ES}=3359$. На 0.6 с споживачі збільшують споживання до максимального рівня ($P_{BH1}=120$ кВт; $P_{BH2}=35$ кВт; $P_{BH3}=37$ кВт) та вмикаються генеруючі установки, а саме дизельний генератор, вітрова енергетична установка, системи зберігання споживають надлишок активної потужності $P_{ES}=4000$ та відбувається генерація реактивної потужності $Q_{ES}=5400$ інвертором системи зберігання енецргії.

В ході експеримента (рис. 7 - 11) після 0.3 с спостерігається поступове збільшення частоти мікромережі але після збільшення споживання на 0.6 с відбувається поступове зниження (рис. 7). Середньоквадратичний струм в вузлах навантаження та генеруючих установках після відімкнення мережі знижується і має незначні коливання (рис. 8,б; рис. 10,б), але після збільшення навантаження зростає і значно збільшується коливання струму. Також спостерігається різний рівень напруги на генеруючих установках (рис. 10,а), рівень напруги на лініях одинаковий (рис. 8,а). Після відімкнення мережі графіки гілок споживачів та генерації активної потужностей зазнають незначних змін (рис. 9а; рис. 11,а). Після збільшення навантаження споживачів на 0.6 с та підвищення генерації потужностей, реактивна потужність споживається системами зберігання енергії та дизельним генератором (рис. 9,б; рис. 11,б), дане явище пояснюється умовами заданими в алгоритмі регулювання генерації та споживання потужностей..

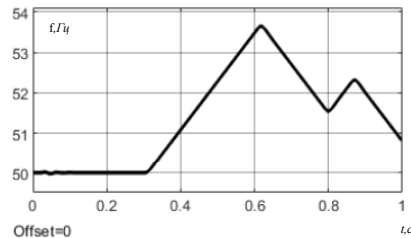
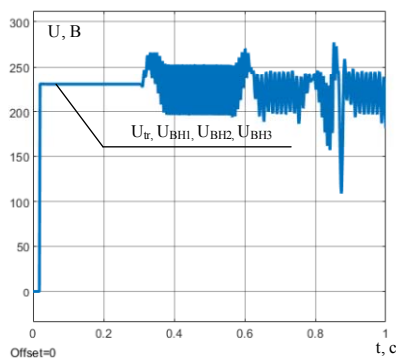
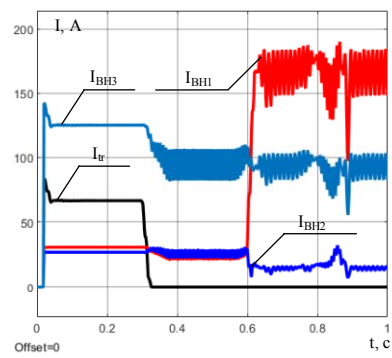


Рисунок 7. Частота мікромережі в експерименті



а)



б)

Рисунок 8. Струм та напруга гілок споживачів в експерименту; а) напруга гілок, б) струм гілок

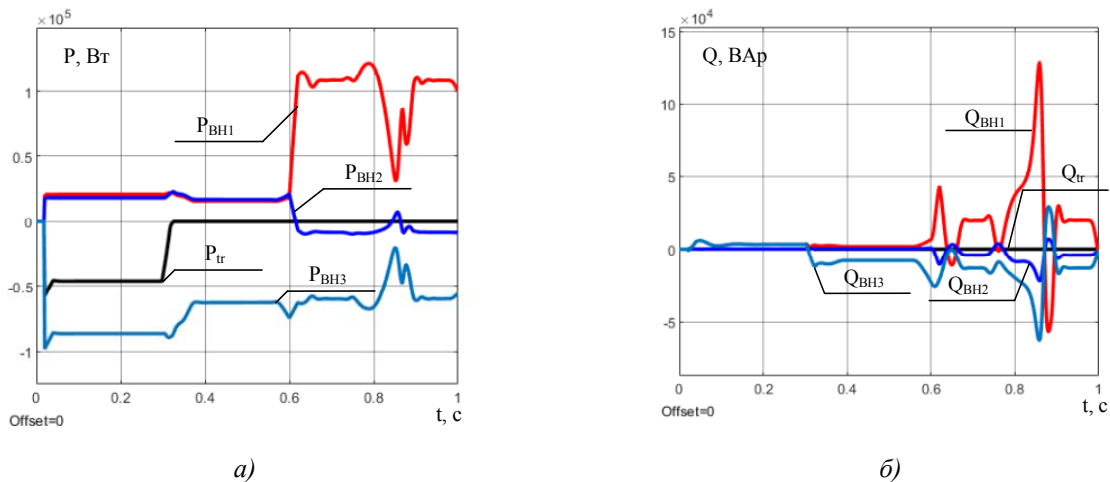


Рисунок 9. Потужність гілок споживачів в експерименту; а) активна потужність, б) реактивна потужність

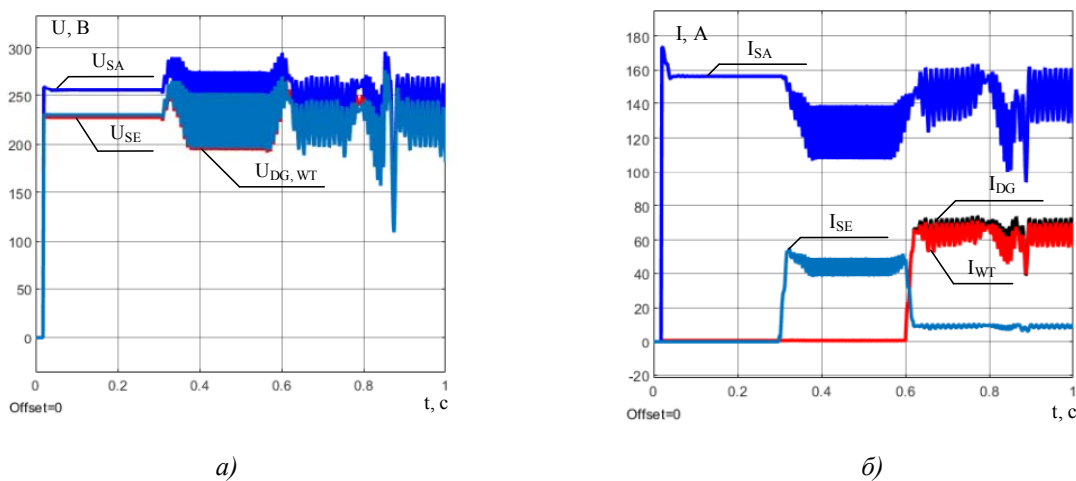


Рисунок 10. Струм та напруга гілок генеруючих установок в експерименту; а) напруга установок, б) струм установок

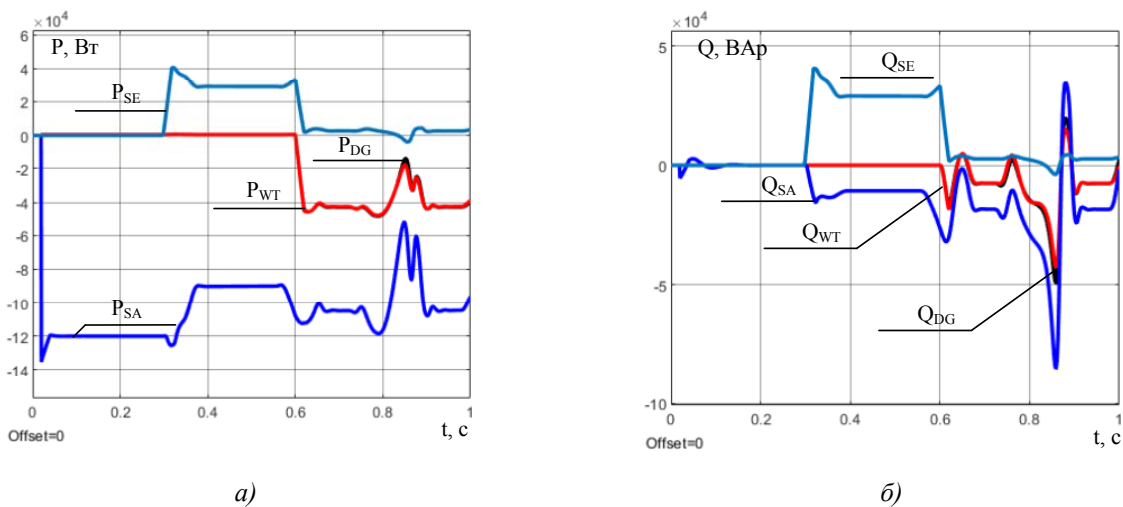


Рисунок 11. Потужність гілок генеруючих установок в експерименту; а) активна потужність, б) реактивна потужність

V. ВИСНОВКИ

Для дослідження розподілу потужностей між споживачами та генеруючими установками в умовах автономної роботи мікромережі проведено розрахунок активної та реактивної потужності споживачів та визначено структуру комплексу автономних генеруючих установок для підтримки електропостачання у разі його відсутності від загальної мережі. Проведено аналіз визначення активної та реактивної потужностей у разі використання машинного навантаження (асинхронних двигунів). Аналогічно за аналізом існуючих джерел визначені активна та реактивна потужності синхронного генератора, що зазвичай використовуються в дизель генераторних електростанціях та асинхронного генератора з фазним ротором, який використовують у вітрогенеруючих комплексах.

Побудовано модель електроенергетичного комплексу в пакеті візуального програмування Matlab/Simulink. Базовим варіантом обрано невелике сільське господарство, а саме птахофабрика з піковим навантаженням 219,2 кВА.

Для запропонованої моделі заплановано експерименти з імітуванням можливих варіантів роботи мікромережі, таких як паралельна робота із зовнішньою мікромережею, автономною роботою мікромережі зі змінами навантажень. За отриманими результатами моделювання встановлено, що за умови паралельної роботи з зовнішньою мережею мікромережа має постійне значення частоти, а відхилення напруги не перевищують розрахункове.

В результаті проведення експерименту з відмиканням зовнішньої мережі, змінами рівня навантаження, відзначені більші коливання напруги та перерозподіл реактивної потужності між споживачами і споживання генеруючими установками. Це явище викликано зокрема формування активної та реактивної потужностей у блоці динамічного навантаження, розрахунок в якому пов'язаний з рівнем напруги та частоти.

В результаті узагальнення отриманих результатів слід відзначити, що розрахунок активної та реактивної потужностей як навантаження так і генеруючих установок необхідно виконувати з урахуванням поточного значення частоти та рівня напруги у вузлі спостереження.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Qusay H, Sameer A, Aws Z. S., Hayder M. Salman, M. J. (2023) A review of hybrid renewable energy systems: Solar and wind-powered solutions: Challenges, opportunities, and policy implications, Results in Engineering, Volume 20, pp. 101621, <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101621>.
- [2] Федосєнко, О. (2023) Керування та управління мікромережевими кластерами: розвиток та майбутні дослідження. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. 2 (7) с. 66–71. <https://doi.org/10.20998/2224-0349.2023.02.02>.
- [3] Hussain A., Shireen W., (2021). Model for frequency dynamics in an islanded microgrid and primary frequency control based on disturbance compensation, in IEEE Access, vol. 9, pp. 52784-52795, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3069769>.
- [4] Sabah K., Nguyen, H., Shakir T., Jaysinghe S. G., J. (2020) Optimal sizing of Battery Energy Storage Systems for dynamic frequency control in an islanded microgrid: A case study of Flinders Island, Australia. Energy. pp. 117059. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117059>.
- [5] Aminzadeh S., Mehrdad T. H., H. S. (2020). Reactive power management for microgrid frequency control. International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 120. pp. 105959. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.105959>.
- [6] Naderipour, A., Abdul-Malek, Z., Davoodkhani, I.F. (2023). Load-frequency control in an islanded microgrid PV/WT/FC/ESS using an optimal self-tuning fractional-order fuzzy controller. Environ Sci Pollut Res 30, pp. 71677–71688. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-14799-1>.
- [7] Dashtdar M., Flah, A. Hosseibinoghadam S. M. S., Attia E-F. (202). Frequency control of the islanded microgrid including energy storage using soft computing. Scientific Reports. 12., 1, . pp. 93-101. <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2018-1-10>.
- [8] Boopathi D.; Jagatheesan K.; Anand B.; Samanta S.; Dey, N. (2023). Frequency Regulation of Interlinked Microgrid System Using Mayfly Algorithm-Based PID Controller. Sustainability, 15, pp. 8829. <https://doi.org/10.3390/su15118829>.
- [9] Davoodkhani I. F., Zare P., Abdelaziz A.Y. (2024) Robust load-frequency control of islanded urban microgrid using 1PD-3DOF-PID controller including mobile EV energy storage. Sci Rep 14, pp. 13962. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-64794-y>.
- [10] Moghayadnia A., Razavi E. (2019). Reactive Power Control In Micro-Grid Networks Using Adaptive Control. Electrical Engineering Electromechanics, (5), pp. 68–73. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2019.5.11>
- [11] Poluri S., Bhattacharya A., Sharma S., (2018). Load frequency control of microgrid considering renewable source uncertainties. pp. 419-423. <https://doi.org/10.1109/ICCPEIC.2018.8525190>.
- [12] Perez F., Lucio. de M., Pedretti A. (2019). Active and Reactive Power control in a grid-connected Microgrid with Energy Storage Management, IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference

- Latin America (ISGT Latin America), Gramado, Brazil, , pp. 1-6, <https://doi.org/10.1109/ISGT-LA.2019.8895366>.
- [13] Manjunath K., (2017). Enhanced Real-Time Power Balancing of an AC Microgrid through Transiently Coupled Droop Control. IET Generation Transmission & Distribution. pp. 1933-1942 <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2016.1250>.
- [14] Smadi I. A., Shehadeh L. I. (2023), An Improved Reactive Power Sharing in an Isolated Microgrid with a Local Load Detection, in Chinese Journal of Electrical Engineering, vol. 9, no. 2, June. pp. 14-26, <https://doi.org/10.1109/ICEARS53579.2022.9752074>
- [15] Свіридов А. П., Величко Т.В. (2019). Електричні системи та мережі. Методичні вказівки до виконання курсового проектування районної електричної мережі для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». Кропивницький: ЦНТУ. – 80 с.
- [16] Грабко В.В., Розводюк М.П., Левицький С.М., Казак М.О., (2007). Експериментальні дослідження електричних машин. Частина III. Асинхронні машини. Навчальний посібник. – Вінниця: ВНТУ, – 197 с.
- [17] Скалько Ю (2015). Системи керування та обліку в електроенергетиці та електромеханіці: навчально-методичний посібник для студентів ЗДІА спеціальності 8(7).05060201 «Гідроенергетика» рівня «магістр» та «спеціаліст» всіх форм навчання; Запоріж. держ. інж. акад. – Запоріжжя: ЗДІА. – 138 с.
- [18] PIRC (2024). Microgrid integration of hybrid PV, DFIG and battery energy, MATLAB Central File Exchange. Retrieved December 26, 2024.

Надійшла (Received) 04.02.2025

Прійнята (Accepted) 11.03.2025

Опублікована (Published) 30.04.2025

RESEARCH ON POWER DISTRIBUTION IN A MICROGRID WITH DISTRIBUTED ELECTRICITY SOURCES

- OLIYNICHENKO M.Y. PhD student at the Department of Electrical Engineering, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Kremenchuk,, Ukraine, e-mail: oliynichenkomaxim@gmail.com; ORCID: 0000-0001-6651-0175
- BIALOBRZYESKYI O.V. D., Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electrical Engineering, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Kremenchuk, Ukraine, e-mail: bialobrzzeski@ukr.net; ORCID: 0000-0003-1669-4580
- POSTIL A.O. PhD student at the Department of Electrical Engineering, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Kremenchuk,, Ukraine, e-mail: artur_postil@kdu.edu.ua; ORCID: 0000-0001-9411-7047

Purpose. Assessment of power flow distribution in a microgrid with autonomous sources to identify the impact of power levels on frequency and voltage levels.

Methodology. The analysis of existing research in the field of electric power engineering has been conducted, focusing on the management of power flows in microgrids with autonomous small- and medium-capacity generating units. As a result of the analysis, it has been established that a relevant challenge is the control and management of active and reactive power flows in microgrids to maintain the frequency and effective voltage level at a predefined value. It has been noted that this issue presents certain complexities due to the instability of primary energy flows from alternative sources, which can lead to both energy shortages and surpluses. Based on the theoretical foundations of electrical engineering and utilizing methods and techniques commonly applied in power supply system calculations, a simulation model with alternative energy sources has been developed, taking into account the power supply system structure of a small agricultural enterprise.

Findings. In the Simulink/Matlab visual programming environment, a simulation model has been developed that enables the study of active and reactive power distribution at network nodes and the monitoring of frequency and voltage magnitude variations. During the research, several experiments were conducted with specific distributions of active and reactive power between consumers and generating units in the microgrid under both parallel and autonomous operating conditions. As a result of the experiment involving disconnection from the external grid and changes in load levels, greater voltage fluctuations and a redistribution of reactive power between consumers and generating units were observed. This phenomenon is primarily caused by the formation of active and reactive power in the dynamic load block, where calculations are linked to the baseline voltage and frequency levels.

Originality. As a result of summarizing the obtained time diagrams, it was found that the calculation of active and reactive power, both for loads and generating units, must be performed considering the current frequency and voltage level at the observation node relative to the baseline values

Practical value. The obtained results should be taken into account in the implementation of control systems for autonomous power sources, specifically in the methods for calculating the current controlled values of active and reactive power

Keywords: active power; reactive power; balance; frequency; voltage.

REFERENCES

- [1] Qusay H, Sameer A, Aws Z. S., Hayder M. Salman, M. J. (2023) A review of hybrid renewable energy systems: Solar and wind-powered solutions: Challenges, opportunities, and policy implications, *Results in Engineering*, Volume 20, pp. 101621, <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101621>.
- [2] Fedoseienko, O. (2023) Control and Management of Microgrid Clusters: Development and Future Research. *Bulletin of the National Technical University 'KhPI'. Series: Energy: Reliability and Energy Efficiency*. 2 (7) c. 66–71. <https://doi.org/10.20998/2224-0349.2023.02.02>.
- [3] Hussain A., Shireen W., (2021). Model for frequency dynamics in an islanded microgrid and primary frequency control based on disturbance compensation, in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 52784-52795, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3069769>.
- [4] Sabah K., Nguyen, H., Shakir T., Jayasinghe S. G., J. (2020) Optimal sizing of Battery Energy Storage Systems for dynamic frequency control in an islanded microgrid: A case study of Flinders Island, Australia. *Energy*. pp. 117059. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117059>.
- [5] Aminzadeh S., Mehrdad T. H., H. S. (2020). Reactive power management for microgrid frequency control. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 120. pp. 105959. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.105959>.
- [6] Naderipour, A., Abdul-Malek, Z., Davoodkhani, I.F. (2023). Load-frequency control in an islanded microgrid PV/WT/FC/ESS using an optimal self-tuning fractional-order fuzzy controller. *Environ Sci Pollut Res* 30, pp. 71677–71688. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-14799-1>.
- [7] Dashtdar M., Flah, A. Hosseibinoghadam S. M. S., Attia E-F. (202). Frequency control of the islanded microgrid including energy storage using soft computing. *Scientific Reports*. 12., 1, . pp. 93-101. <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2018-1-10>.
- [8] Boopathi D.; Jagatheesan K.; Anand B.; Samanta S.; Dey, N. (2023). Frequency Regulation of Interlinked Microgrid System Using Mayfly Algorithm-Based PID Controller. *Sustainability*, 15, pp. 8829. <https://doi.org/10.3390/su15118829>.
- [9] Davoudkhani I. F., Zare P., Abdelaziz A.Y. (2024) Robust load-frequency control of islanded urban microgrid using 1PD-3DOF-PID controller including mobile EV energy storage. *Sci Rep* 14, pp. 13962. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-64794-y>.
- [10] Moghayadnia A., Razavi E. (2019). Reactive Power Control In Micro-Grid Networks Using Adaptive Control. *Electrical Engineering Electromechanics*, (5), pp. 68–73. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2019.5.11>
- [11] Poluri S., Bhattacharya A., Sharma S., (2018). Load frequency control of microgrid considering renewable source uncertainties. pp. 419-423. <https://doi.org/10.1109/ICCPEIC.2018.8525190>.
- [12] Perez F., Lucio. de M., Pedretti A. (2019). Active and Reactive Power control in a grid-connected Microgrid with Energy Storage Management, *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference - Latin America (ISGT Latin America)*, Gramado, Brazil, , pp. 1-6, <https://doi.org/10.1109/ISGT-LA.2019.8895366>.
- [13] Manjunath K., (2017). Enhanced Real-Time Power Balancing of an AC Microgrid through Transiently Coupled Droop Control. *IET Generation Transmission & Distribution*. pp. 1933-1942 <https://doi.org/11.10.1049/iet-gtd.2016.1250>.
- [14] Smadi I. A., Shehadeh L. I. (2023), An Improved Reactive Power Sharing in an Isolated Microgrid with a Local Load Detection, in *Chinese Journal of Electrical Engineering*, vol. 9, no. 2, June. pp. 14-26, <https://doi.org/10.1109/ICEARS53579.2022.9752074>
- [15] SVIRIDOV A. P., Velychko T. V. (2019). *Electrical Systems and Networks. Methodological Guidelines for the Course Project on Regional Electrical Network Design for Students of Specialty 141 'Electric Power Engineering, Electrical Engineering, and Electromechanics'*. Kropyvnytskyi: CNTU. – 80 c.
- [16] Hrabko V. V., rozvodiuk M. P., Levytskyi S. M., Kazak M. O., (2007). *Experimental Studies of Electrical Machines. Part III. Asynchronous Machines*. Textbook. – Vinnytsia: VNTU. – 197 pages.
- [17] Skalko Y. (2015). *Control and Accounting Systems in Electric Power Engineering and Electromechanics: Educational and Methodological Guide for Students of ZDIA, Specialty 8(7).05060201 'Hydropower Engineering' at the Master's and Specialist Levels in All Forms of Study*. Zaporizhzhia State Engineering Academy. – Zaporizhzhia: ZDIA. – 138 p.
- [18] PIRC (2024). *Microgrid integration of hybrid PV, DFIG and battery energy*, MATLAB Central File Exchange. Retrieved December 26, 2024.

УДК 621.39.004.021

ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРУ АВАРІЙНИХ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПІДПРИЄМСТВ

- ПАПАЙКА Ю.А. д-р. техн. наук, професор, завідувач кафедри електроенергетики НТУ "Дніпровська політехніка", Дніпро, Україна, e-mail: rapaika.yu.a@nmu.one, ORCID: <https://orcid.org/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, ORCID: <https://orcid.org/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, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3375-0903>;
- БУРТНИЙ Д.І. магістр спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка НТУ "Дніпровська політехніка", Дніпро, Україна, e-mail: dmitriyivanov5862@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-7758-8566>;
- УДОВИК О.В. аспірант спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка НТУ "Дніпровська політехніка", Дніпро, Україна, e-mail: udovyk.o.v@nmu.one, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-1000-7815>.

Мета роботи. Дослідити характер аварійних перехідних процесів у системах електропостачання підприємств з метою виявлення основних причин виникнення аварійних ситуацій, виявити особливості протікання процесів, оцінити їх вплив на надійність систем електропостачання. Стаття ставить перед собою мету дослідження впливу режимів нейтралі на безпеку людини та дослідження методів контролю ізоляції мереж напругою 6 – 10 кВ для підвищення безпеки експлуатації електричних мереж підприємств.

Методи дослідження. Дослідження характеру аварійних перехідних процесів виконано шляхом статистичного аналізу з обробки даних про виникнення аварійних ситуацій на діючих підприємствах України та аналізу існуючих методів розрахунку, які наведено у науково – технічній літературі. Визначення основних причин та закономірностей розвитку процесів виконано шляхом аналізу аварійних процесів які виникають у мережах з ізолюваною нейтраллю при однофазному "металевому" замиканні на землю на початкових стадіях аварійного режиму та в післяаварійному режимі.

Отримані результати. Результатом проведеного аналізу основних закономірностей перебігу аварійних перехідних процесів в системах електропостачання підприємств є визначення початкового характеру процесів у мережах з ізолюваною нейтраллю під час однофазного замикання на землю та характеру процесів у післяаварійному режимі роботи. Також у статті виведено формули з розрахунку впливу режиму нейтралі на електробезпеку людини під час експлуатації розподільчих мереж. З метою підвищення надійності систем електропостачання та зниження ймовірності виникнення аварійних ситуацій у статті запропоновано метод контролю параметрів ізоляції електричних мереж напругою 6 – 10 кВ.

Наукова новизна. Визначення впливу сучасного обладнання на характер перебігу аварійних перехідних процесів, в тому числі з урахуванням нелінійного навантаження та вищих гармонік. Оцінка взаємозв'язку між параметрами перехідного процесу та надійності електропостачання, вплив аварійних режимів на технологічні процеси підприємства.

Практична цінність. Результат дослідження дає змогу проводити оцінку наслідків аварійних перехідних процесів у системах електропостачання підприємств, що веде до збільшення надійності систем електропостачання та покращенню умов безпеки праці на енергетичних об'єктах. Залежності впливу режиму нейтралі на електробезпеку при експлуатації розподільчих мереж.

Ключові слова: аварійні перехідні процеси; енергетична безпека; системи електропостачання; промислове енергозабезпечення; аналіз режимів; закономірності перебігу аварійних процесів.

I. ВСТУП

Надійність електропостачання є одним із ключових чинників стабільного функціонування промислових підприємств. Ускладнення конфігурації

електричних мереж призводить до використання високочутливого обладнання, яке обумовлює необхідність дослідження характеру аварійних перехідних процесів, зокрема процесів, що супроводжують порушення нормальної роботи систем

електропостачання підприємств напругою 6 – 10 кВ [1]. Актуальність дослідження характеру аварійних перехідних процесів полягає у розумінні основних чинників які спричиняють аварійні режими [2], [3]. У статті розглядаються ключові питання, пов'язані з аварійними перехідними процесами, зокрема аналізуються початкові умови виникнення аварійних режимів, процес протікання перехідного процесу та стан мережі в післяаварійному режимі. Особлива увага приділена питанню впливу режиму нейтралі на електробезпеку обслуговуючого персоналу. Також окремо розглядаються методи контролю ізоляції в мережах напругою 6 – 10 кВ, що є важливим кроком до підвищення рівня ранньої діагностики пошкоджень та запобігання аваріям [4], [5].

II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Проблематика аварійних перехідних процесів широко розглядається в наукових публікаціях галузі теорії електричних кіл та електромагнітних процесів. З розвитком галузі електронно розрахункових машин в останні роки велика увага приділяється новітнім методам розрахунку, які базуються на впровадженні цифрових технологій моніторингу та запобігання аваріям у технологічний процес. Зокрема розглядаються аспекти виявлення аварійних режимів в реальному часі з проведенням оцінки ступеня зносу ізоляційних матеріалів обладнання [6]. Проте, незважаючи на значну кількість досліджень у цій галузі, низка важливих аспектів залишається недостатньо висвітленою [7].

Одним з важливих аспектів проблеми є необхідність кореляції характеру перебігу аварійних перехідних процесів у системах електропостачання підприємств з технічними аспектами експлуатації обладнання та питанням електричної безпеки персоналу під час роботи з обладнанням в залежності від режиму нейтралі. Також недостатньо розглянуто питання практичної методики оцінки параметрів ізоляції мереж напругою 6 – 10 кВ.

Таким чином актуальність дослідження полягає у необхідності глибокого аналізу характеру аварійних перехідних процесів в системах електропостачання підприємств, з урахуванням впливу режиму нейтралі на електробезпеку та вдосконаленні методів контролю ізоляції, що є критично важливими критеріями для забезпечення надійності та безперебійності роботи промислових об'єктів з обмеженими можливостями.

III. МЕТА РОБОТИ

Мета даної роботи - дослідження аварійних струмів у перехідному режимі в електричних мережах при несиметричних пошкодженнях, що необхідно для визначення частоти власних коливань напруги і струмів нульової послідовності, розрахунку тривалості процесу. Результат дослідження дозволяє отримати залежності напруги дотику до корпусів

електрообладнання від тривалості перехідного процесу.

IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГУ МАТЕРІАЛУ І АНАЛІЗ ОТРИМАННИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Початковий характер перехідних процесів під час виникнення аварійних режимів

Аварійні режими призводять до миттєвих змін електричних параметрів мережі [8]. Серед найбільш поширених причин виникнення збурень у мережах промислових підприємств із ізолюваною нейтраллю є пошкодження ізоляції однієї з фаз відносно землі. У початковій фазі перехідного процесу система намагається адаптуватися до нових умов роботи мережі, причому швидкість реакції залежить від інерційних властивостей мережі, таких як значення індуктивного, ємнісного та активного опорів. Виникнення аварійного процесу безпосередньо впливає на систему в цілому, адже призводить до перерозподілу електричних параметрів у фазних провадах.

У системах з ізолюваною нейтраллю під час однофазного замикання на землю перехідний процес має особливий характер. В початковий момент перехідного процесу виникає імпульс струму, який спричинений перерозподілом енергії накопиченої в ємності фазних проводів відносно землі. Значення напруги у пошкодженій фазі спадає до нуля одночасно з збільшенням напруги у непошкоджених фазах. Тобто відбувається фізичний процес перерозподілу заряду між пошкодженою фазою та потенціалом землі, а також появою надлишкового заряду у непошкоджених фазах [9].

Струм металевого замикання на землю у перехідному режимі характеризується максимальними значеннями трьох складових. Для детального розуміння виразів, що описують співвідношення між параметрами перехідного процесу скористаємося спрощеною схемою заміщення мережі, наведеної на рис. 1.

Усталена складова перехідного струму може бути розрахована [1]:

$$I_z = 3U_{\phi} \omega c \quad (1)$$

Усталена складова перехідного струму зберігається в електричному колі після завершення перехідного процесу. Значення складової відображає режим роботи системи, який встановлюється після завершення дії збурень, значення складової є постійною величиною або періодичною у часі. Тобто усталена складова характеризує післяаварійний режим роботи мережі після завершення дії чинника, яким було розпочато перехідний процес.

В початковий момент виникнення перехідного процесу виникає перехідна складова, яка характеризує

частину струму або напруги, виникає у момент зміни режиму роботи електричної системи та завершує вплив з завершенням часу перебігу перехідного процесу. Основною причиною виникнення складової є інерційність елементів системи, тобто наявність індуктивної та ємнісної складової, які унеможливають миттєву зміну значень струму та напруги. Тобто під час металевого замикання на землю перехідна складова зумовлена зміною потенціалу нейтралі при виникненні замикання фазного провідника відносно землі за наявності напруги в непошкоджених фазах [1]:

$$i_{a1} = \frac{2}{3} I_{3M} \frac{c}{c + c_M} \sin \omega t_0 \quad (2)$$

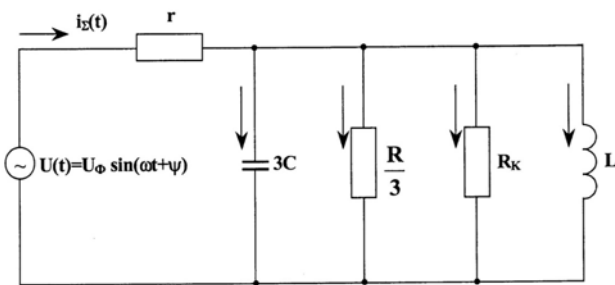


Рисунок 1. Спрощена схема заміння системи електропостачання підприємства для дослідження початкового характеру аварійних перехідних процесів при металевому короткому замиканні

Перехідна складова, значення якої обумовлено зміною напруг непошкоджених фаз [1]:

$$i_{a1} = \frac{2}{3} I_{3M} \frac{c}{c + c_M} \frac{\omega_{CB}}{\omega} \cos \omega t_0 \quad (3)$$

де C_M - міжфазна ємність всієї електрично пов'язаної мережі;

t_0 - початок відліку часу, що відповідає моменту позитивного максимуму напруги пошкодженої фази;
 ω_{CB} - кутова частота вільних коливань системи в режимі однофазного замикання на землю.

Дослідження початкового характеру аварійних перехідних процесів можливо провести виходячи з припущення, що окрім вільних коливань середньої частоти в мережі наявні високочастотні коливання, особливо на початкових стадіях перехідного процесу, які затухають упродовж чверті періоду промислової частоти.

З урахуванням виразів, які відображають зв'язок між фізичними явищами перехідного процесу у часі, вираз вільної складової перехідного струму, відповідно до значення усталеної складової струму [1]:

$$i_{a.CB} = I_{3M} \frac{\gamma}{3\gamma} = I_{3M} \frac{z}{r} = I_{3M} \frac{R}{3r\sqrt{1 + (\omega CR)^2}} \quad (4)$$

Наведений вираз демонструє, що кратність зміни вільної складової струму замикання визначається з співвідношення опору ізоляції мережі відносно потенціалу землі і перехідного опору [1]:

$$Z = \frac{R}{3r\sqrt{1 + (\omega CR)^2}} \quad (5)$$

Характер перехідних процесів в після аварійному режимі

Перехідні процеси в післяаварійному режимі мають динамічний, нестационарний характер, якому відповідає наявність електромагнітних коливань. Електромагнітні процеси характеризуються швидким перебігом у часі. Під час замикання на землю система електропостачання підприємства переходить на режим роботи, який характеризується швидкою зміною усталених параметрів на примусові. В зазначений період часу значення зсуву нейтралі коливається від нуля до значення напруги у непошкодженій фазі. За результатом роботи пристроїв захисної апаратури або факторів які обумовлюють самостійне завершення перехідного процесу розрив струму замикання відбувається у момент переходу значення струму замикання через нуль. Тобто фізично процес відновлення напруги у пошкодженій фазі відбувається упродовж певного проміжку часу зі зростанням від нульового значення, для випадку металевого замикання на землю.

На рис. 2 зображена спрощена схема заміння мережі для дослідження перехідних процесів, що виникають після зникнення замикання фази на землю.

Напруга джерела живлення пошкодженої фази визначається [1]:

$$U(t) = U_\phi \sin(\omega t + \phi) \quad (6)$$

Напруга джерела в момент відключення пошкодження [1]:

$$U(t = 0) = U_\phi \sin \phi \quad (7)$$

Відключення пошкодженої ділянки електричного кола веде до закінчення аварійного перехідного процесу та появи коливальних процесів у контурі який складається з індуктивної та ємнісної складової мережі.

Найбільш значущими характеристиками отриманого контуру, які враховуються при дослідженні післяаварійних перехідних процесів є значення коливальної частоти та постійна часу

затухання [10].

Значення коливальної частоти:

$$\omega'_{CB} = \frac{I}{\sqrt{L_p C_\Sigma}} = \frac{I}{\sqrt{3L_p C}} \quad (8)$$

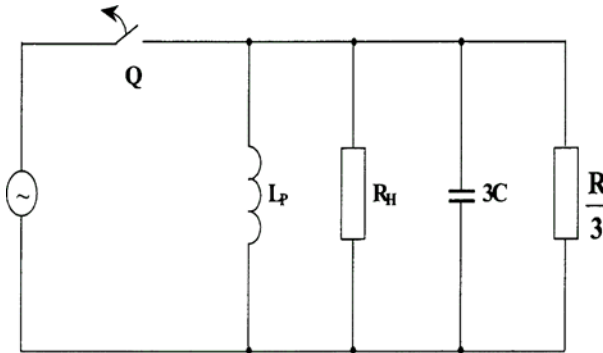


Рисунок 2. Спрощена схема заміщення системи електропостачання підприємства для дослідження перехідних процесів після усунення замикання фази на землю

Вплив режиму нейтралі на електробезпеку при експлуатації розподільчих мереж

Загальні показники електричної безпеки оцінюються величиною струму, що проходить через тіло людини.

В мережах із повністю ізолюваною нейтраллю струм через тіло людини проходить при безпосередньому дотику до однієї з фаз з повністю ізолюваною нейтраллю [11].

На графіку нижче наведено залежності значення струму через людину при дотику до однієї фази мережі з ізолюваною нейтраллю від сумарної ємності однієї фази мережі відносно землі.

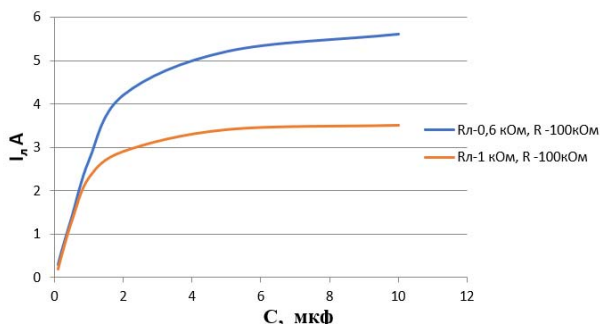


Рисунок 3. Графік проходження струму через тіло людини залежно від ємності мережі

Аналіз графічних залежностей показує, що для часу впливу електричного струму на організм людини до моменту спрацювання пристроїв захисту мереж напругою до 11 кВ допускається ємність мережі

відносно землі не більше 0,1 мкФ на фазу і активного опору ізоляції не менш ніж 100 кОм на фазу.

На рис. 4 криві 1 та 2 відображають зміну величини напруги дотику в мережі з ізолюваною нейтраллю, при глухому (коефіцієнт $k_6=1$) і дуговому (коефіцієнт $k_6=4$) замиканні на землю залежно від величини ємності мережі відносно землі за опору захисного заземлення 4 Ом.

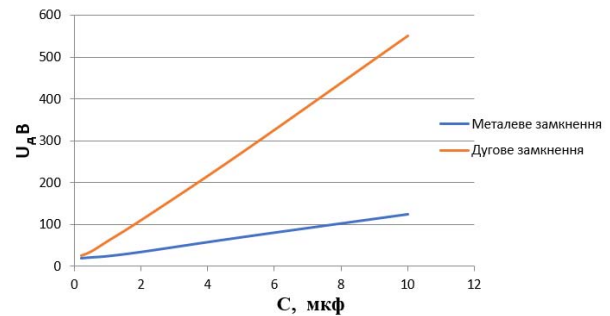


Рисунок 4. Залежність напруги дотику від ємності мережі

При умовах експлуатації, що передбачають дію захисту від однофазних замикань на землю з вимкненням без витримки часу, час впливу на організм людини напруги дотику дорівнює близько 0,3 с.

Метод контролю параметрів ізоляції мереж напругою 6 – 10 кВ

Підвищення надійності і безпеки роботи систем електропостачання залежить від параметрів ізоляції електричної мережі відносно землі [12].

Для підвищення показників надійності та безпеки функціонування системи електропостачання підприємств необхідна система безперервного контролю стану ізоляції.

Сутність запропонованого методу полягає у накладанні двох оперативних сигналів, з частотами, які не рівні між собою та відрізняються від промислової. Пристрої моніторингу та SCADA система підключається у місці підключення оперативного джерела.

Значення оперативного струму в підконтрольній мережі:

$$I = U/Z \quad (9)$$

де I – струм накладеного сигналу;

U – напруга оперативного джерела.

При накладанні двох сигналів на мережу:

$$I_1 = \frac{U_1}{R + j \frac{1}{\omega_1 c}}, I_2 = \frac{U_2}{R + j \frac{1}{\omega_2 c}} \quad (10)$$

Припустивши, що активний опір ізоляції не зменшується ($R = \text{const}$), отримуємо вираз для ємності:

$$C = \frac{I_1 I_2 (\omega_2 - \omega_1)}{\omega_2 \omega_1 (U_1 I_2 - U_2 I_1)} \quad (11)$$

Передбачається побудова SCADA системи за модульним принципом компонування за рахунок перспективної можливості подальшого розширення та модернізації. Дослідження впливу режиму роботи нейтралі на значення струмів однофазного замикання на землю проводились в умовах феросплавного виробництва (рис. 5) [13].

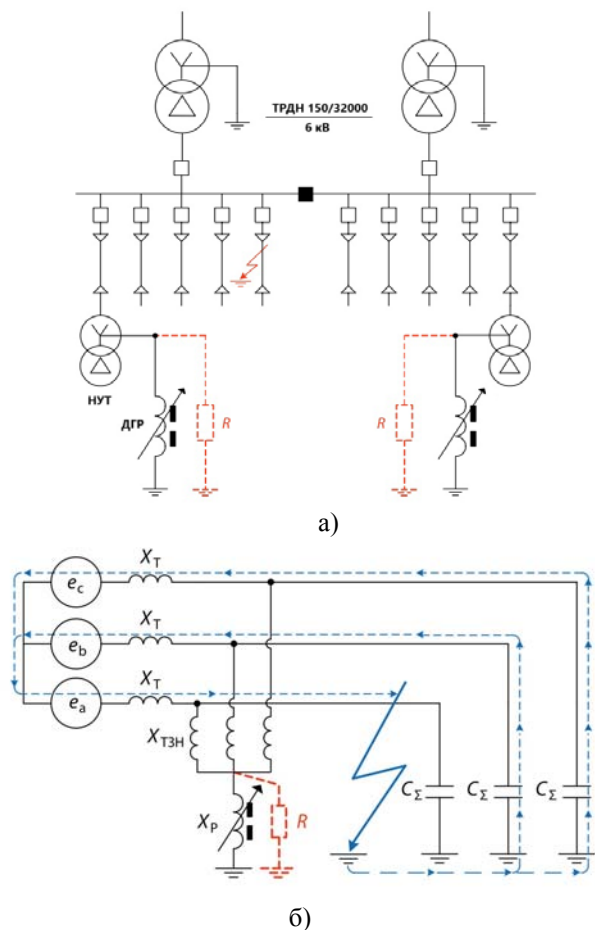


Рисунок 5. Схема електропостачання підприємства (а) та схема заміщення (б)

У мережах з ізолюваною нейтраллю пошкодження ізоляції щодо землі однієї з фаз призводить до повного перерозподілу фазних напруг у всій системі, а джерелом змін є місце пошкодження.

Перехідний процес у цьому випадку характеризується стіканням заряду з провідників пошкодженої фази та їх розрядом до потенціалу землі, а також перенесенням додаткового заряду на непошкоджені фази для надання їм нового потенціалу щодо землі (рис. 6).



Рисунок 6. Приклад перерозподілу напруг при однофазному «металевому» замиканні на землю в мережі з ізолюваною нейтраллю

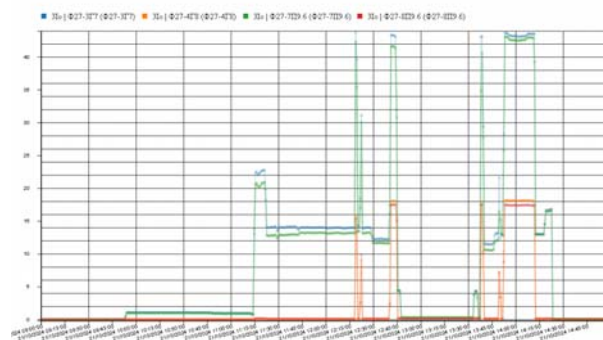


Рисунок 7. Приклад стікання заряду з провідників пошкодженої фази та їх розрядом до потенціалу землі з усіх ділянок мережі

Коректність розрахунків струмів однофазного замикання на землю підтверджується даними, зафіксованими на реєстраторі аварійних подій з урахуванням коефіцієнту трансформації трансформатора струму нульової послідовності та відключеним секційним вимикачем, що зменшує ємність мережі вдвічі. При цьому значення струму замикання досягає 55А, що перевищує допустимі ПУЕ межі (рис. 7).

З метою підвищення функціональної надійності пристроїв першого і другого ступенів захисту від однофазних замикань на землю розроблено наступні рекомендації:

Для зменшення впливу перехідних процесів на якість роботи пристроїв захисту від замикань на землю, а також з метою виключення або зменшення ймовірності появи ферорезонансних процесів, режим

нейтралі розподільчої мережі слід перевіряти для усіх варіантів схем живлення підприємства [14].

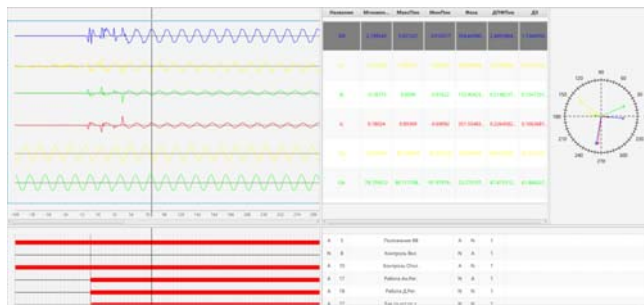


Рисунок 8. Зареєстрований перехідний процес при однофазному замиканні на землю

Якщо мережа працює з повністю ізольованою нейтраллю, то для наявних у розподільчій мережі вимірювальних трансформаторів напруги, що працюють із заземленою нейтраллю, відповідно до ПУЕ, слід навантажити додаткову обмотку, увімкнену за схемою розімкненого трикутника, активним опором величиною 25 Ом і потужністю 100 Вт. Тому створення додаткової активної складової струму замикання на землю (режим роботи мережі з резистором у нейтралі) в електричних мережах напругою 6 і 10 кВ системи електропостачання феросплавного підприємства є простим та дієвим способом обмеження струмів замикання.

Для створення додаткового штучного активного струму замикання можуть використовуватися резистори, які підключаються між нейтральною точкою мережі і землею. У цьому випадку високовольтний резистор може приєднуватися:

- до нейтралі силового трансформатора при з'єднанні його обмоток у зірку з виведеною нульовою точкою;
- до нейтралі первинної обмотки спеціального заземлювального трансформатора;
- між кожною фазою і землею трьох опорів, з'єднаних у зірку з штучною нульовою точкою.

V. ВИСНОВКИ

У мережах з повністю ізольованою нейтраллю коливальний процес визначається наявністю в мережі вимірювальних трансформаторів напруги із заземленою нульовою точкою первинної обмотки. Характер перехідного процесу (частота власних коливань напруги і струмів нульової послідовності та тривалість процесу) визначається головним чином сумарною ємністю мережі відносно землі та кількістю одночасно увімкнених вимірювальних трансформаторів напруги. Для реальних параметрів розподільчих мереж тривалість перехідного процесу знаходиться в межах від 2 до 10 періодів промислової частоти, а частота вільних коливань, як правило,

менша за промислову частоту. Частота вільних коливань безпосередньо в процесі затухання коливань змінюється через нелінійний характер реактивного опору вимірювальних трансформаторів напруги.

У мережах з компенсованою нейтраллю характер перехідного процесу за інших рівних умов залежить від режиму налаштування компенсуючого пристрою. Затухання напруги на нейтралі визначається головним чином параметрами ізоляції розподільчої мережі відносно землі і не залежить від режиму налаштування компенсуючого пристрою. Частота вільних коливань і стала часу їх затухання в компенсованих мережах значно перевищують аналогічні характеристики в мережах з повністю ізольованою нейтраллю.

При замиканнях на корпус через переважаючу дугу напруга дотику перевищує короткочасно допустиме значення при ємності електрично пов'язаної мережі відносно землі приблизно 2,5 мкФ на фазу і тривало допустиме значення при ємності мережі приблизно 0,3 мкФ на фазу. В усталеному режимі замикання (при відсутності перехідного процесу) напруга дотику перевищить тривало допустиме значення при ємності мережі відносно землі приблизно 1,6 мкФ на фазу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Pivnyak G.G., Zhezhelenko I.V., Papaika Y.A. (2016), Transients in Electric Power Supply Systems, Trans Tech Publications LTD, Switzerland. <http://trove.nla.gov.au/version/232262440>.
- [2] 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>
- [3] Papaika Y. Mathematical modeling of power supply reliability at low voltage quality / Yurii Papaika, Oleksandra Lysenko, Yevgenij Koshelenko, Illa Olishevskiy // *Nauk. Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, - 2021 (2), p.97–103. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-2/097>.
- [4] 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; 12(16):3190. <https://doi.org/10.3390/en12163190>.
- [5] Pivnyak G. ASSESSMENT OF POWER SUPPLY ENERGY EFFICIENCY BY VOLTAGE QUALITY CRITERION / Gennadiy Pivnyak, Oleksandr Azukovskiy, Yurii Papaika, Careres Cabana Edgar, Olczak Pawel, Artur Dyczko // *Rynek Energii*. - 2021 № 4(155). p. 75-84. ISSN 14255960.
- [6] IEEE 1547:2003-Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power System.
- [7] Pivniak H. Problems of development of innovative

- power supply systems of Ukraine in the context of European integration / H. Pivniak, O. Aziukovskiy, Yu. Papaika, I. Lutsenko, N. Neuberger // *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu.* - 2022 (5), 89-103. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-5/089>.
- [8] Shcherba M. Mathematical Modeling of Electric Current Distribution in Water Trees Branches in XLPE Power Cables Insulation / M. Shcherba, A. Shcherba, Y. Peretyatko // *Proc. IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems. ESS 2020.* Kyiv, Ukraine, May 12-14, 2020. p. 353–356. <https://doi.org/10.1109/ESS50319.2020.9160293>.
- [9] Smolenski R. Conducted electromagnetic interference (EMI) in Smart Grids / R. Smolenski. London, Springer, 2017, 198 pp.
- [10] Babak S. Analysis of UAVs and Their Technical Parameters for Overhead Power Lines Monitoring / S. Babak, A. Zaporozhets, O. Gryb, I. Karpaliuk // *Studies in Systems, Decision and Control.* – 2023. 454, p. 181–193 https://doi.org/10.1007/978-3-031-22464-5_10.
- [11] Sokol Y. Theoretical Basis of Determination of Corona Discharge Coordinates by Acoustic Radiation / Y. Sokol, V. Babak, A. Zaporozhets, O. Gryb, I. Karpaliuk, R. Demianenko // *Studies in Systems, Decision and Control.* – 2024. 509, p. 137–153. https://doi.org/10.1007/978-3-031-44025-0_7.
- [12] Nikander A.; Järventausta P. Identification of High-Impedance Earth Faults in Neutral Isolated or Compensated MV Networks. *IEEE Trans. Power Deliv.* 2017, 32, 1187–1195. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7809183>.
- [13] Papaika Yu., Lysenko O., Rogoza M., Stepanenko Yu., Tokar L., Yakimets S. (2019). Energy losses within the electric equipment in terms of poor voltage quality. *Bulletin of Mykhailo Ostrohradskiy KrNU 1/2019* (114), 9–13. <https://doi.org/10.30929/1995-0519.2019.1.9-13>.
- [14] Abbas A. K., Hamad S., and Hamad N. A. ‘Single line to ground fault detection and location in medium voltage distribution system network based on neural network’, vol. 23, no. 2, pp. 621–632, 2021, <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v23.i2.pp621-632>.

Надійшла (Received) 10.03.2025;
Прийнята (Accepted) 05.04.2025;
Опублікована (Published) 30.04.2025.

STUDY OF THE NATURE OF EMERGENCY TRANSIENT PROCESSES IN POWER SUPPLY SYSTEMS OF ENTERPRISES

- 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, ORCID: <https://orcid.org/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, ORCID: <https://orcid.org/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, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3375-0903>;
- BURTNYI D.I. Master of specialty 141 Electric power engineering, electrical engineering and electromechanics, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine, e-mail: dmitriyivanov5862@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-7758-8566>;
- 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, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-1000-7815>.

Purpose. To investigate the nature of emergency transient processes in power supply systems of enterprises in order to identify the main causes of emergency situations, identify the features of the processes, and assess their impact on the reliability of power supply systems. The article aims to study the impact of neutral modes on human safety and to study methods for controlling the insulation of networks with a voltage of 6–10 kV to improve the safety of operation of electrical networks of enterprises.

Methodology. The study of the nature of emergency transient processes was carried out through statistical analysis of data processing on the occurrence of emergency situations at operating enterprises of Ukraine and analysis of existing calculation methods given in the scientific and technical literature. The main causes and patterns of process development were determined by analyzing emergency processes that occur in networks with an isolated neutral during a single-phase "metal" ground fault at the initial stages of the emergency mode and in the post-emergency mode.

Findings. The result of the analysis of the main patterns of the course of emergency transient processes in the power supply systems of enterprises is the determination of the initial nature of the processes in networks with an isolated neutral during a single-phase ground fault and the nature of the processes in the post-emergency operating mode. The article also derives formulas for calculating the neutral mode impact on human electrical safety during the operation of distribution networks. In order to increase the reliability of power supply systems and reduce the likelihood of emergency situations, the article proposes a method for controlling the insulation parameters of electrical networks with a voltage of 6 - 10 kV.

Originality. Determination of the modern equipment impact on the nature of emergency transients, including nonlinear load and higher harmonics. Evaluation of the relationship between the transient process parameters and the power supply reliability, the impact of emergency modes on the technological processes of the enterprise.

Practical value. The result of the study makes it possible to assess the consequences of emergency transients in the power supply systems of enterprises, which leads to an increase in the reliability of power supply systems and improvement of labor safety conditions at energy facilities. Study of the influence of the neutral mode on electrical safety during the operation of distribution networks.

Keywords: emergency transient processes; energy security; power supply systems; industrial energy supply; mode analysis; patterns of emergency processes.

REFERENCES

- [1] Pivnyak G.G., Zhezhelenko I.V., Papaika Y.A. (2016), Transients in Electric Power Supply Systems, Trans Tech Publications LTD, Switzerland. <http://trove.nla.gov.au/version/232262440>.
- [2] 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>
- [3] Papaika Y. Mathematical modeling of power supply reliability at low voltage quality / Yurii Papaika, Oleksandra Lysenko, Yevgenij Koshelenko, Illa Olishevskiy // *Nauk. Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, - 2021 (2), p.97–103. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-2/097>.
- [4] 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; 12(16):3190. <https://doi.org/10.3390/en12163190>.
- [5] Pivnyak G. Assessment of power supply energy efficiency by voltage quality criterion / Gennadiy Pivnyak, Oleksandr Azukovskiy, Yurii Papaika, Careres Cabana Edgar, Olczak Pawel, Artur Dyczko // *Rynek Energii*. - 2021 № 4(155). p. 75-84. ISSN 14255960.
- [6] IEEE 1547:2003-Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power System.
- [7] Pivniak H. Problems of development of innovative power supply systems of Ukraine in the context of European integration / H. Pivniak, O. Aziukovskiy, Yu. Papaika, I. Lutsenko, N. Neuberger // *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. - 2022 (5), 89-103. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-5/089>.
- [8] Shcherba M. Mathematical Modeling of Electric Current Distribution in Water Trees Branches in XLPE Power Cables Insulation / M. Shcherba, A. Shcherba, Y. Peretyatko // *Proc. IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems. ESS 2020*. Kyiv, Ukraine, May 12-14, 2020. p. 353–356. <https://doi.org/10.1109/ESS50319.2020.9160293>.
- [9] Smolenski R. Conducted electromagnetic interference (EMI) in Smart Grids / R. Smolenski. London, Springer, 2017, 198 pp.
- [10] Babak S. Analysis of UAVs and Their Technical Parameters for Overhead Power Lines Monitoring / S. Babak, A. Zaporozhets, O. Gryb, I. Karpaliuk // *Studies in Systems, Decision and Control*. – 2023. 454, p. 181–193 https://doi.org/10.1007/978-3-031-22464-5_10.
- [11] Sokol Y. Theoretical Basis of Determination of Corona Discharge Coordinates by Acoustic Radiation / Y. Sokol, V. Babak, A. Zaporozhets, O. Gryb, I. Karpaliuk, R. Demianenko // *Studies in Systems, Decision and Control*, – 2024. 509, p. 137–153. https://doi.org/10.1007/978-3-031-44025-0_7.
- [12] Nikander A.; Järventausta P. Identification of High-Impedance Earth Faults in Neutral Isolated or Compensated MV Networks. *IEEE Trans. Power Deliv.* 2017, 32, 1187–1195. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7809183>.
- [13] Papaika Yu., Lysenko O., Rogoza M., Stepanenko Yu., Tokar L., Yakimets S. (2019). Energy losses within the electric equipment in terms of poor voltage quality. *Bulletin of Mykhailo Ostrohradskiy KrNU 1/2019* (114), 9–13. <https://doi.org/10.30929/1995-0519.2019.1.9-13>.
- [14] Abbas A. K., Hamad S., and Hamad N. A. ‘Single line to ground fault detection and location in medium voltage distribution system network based on neural network’, vol. 23, no. 2, pp. 621–632, 2021, <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v23.i2.pp621-632>.